FORCLIM
BOSQUES Y CAMBIO GLOBAL

Volumen 2
Colombia - Ecuador

Ángel M. Felicísimo (coord.), Mauricio Ramírez,
Elena Posada, Felipe Fonseca, Fernando Berenguer,
Christian Martínez, Gioconda Remache

Red Temática CYTED 408RT0338



2011

FORCLIM

Bosques y cambio global

Volumen 2

Colombia - Ecuador

Autores:

Colombia (I): Mauricio Ramírez, Elena Posada, Felipe Fonseca

Colombia (II): Ángel M. Felicísimo, Fernando Berenguer

Ecuador: Christian Martínez, Gioconda Remache

Coordinador:

Ángel M. Felicísimo

Red Temática CYTED 408RT0338



A efectos bibliográficos, este libro debe citarse como sigue:

Felicísimo, Á. M. (coord.); Ramírez, M.; Posada, E.; Fonseca, F.; Berenguer, F.; Martínez, C.; Remache, R. 2011. FORCLIM, Bosques y cambio global. 2. Colombia - Ecuador. CYTED, Madrid, 138 pág.

ISBN (obra completa): 978-84-15482-61-1.
ISBN (papel): 978-84-686-0147-2

Editor: Bubok Publishing S.L.

Primera edición, 2011.

El proyecto ha sido financiado por el Programa CYTED (http://www.cyted.org/) y realizado por la Red Temática FORCLIM.

Contenido

Colombia: grandes biomas del bosque tropical y cambio climático

Mauricio Ramírez, Elena Posada, Felipe Fonseca

Contacto:
Instituto Geográfico Agustín Codazzi
http://www.igac.gov.co/
Bogotá, Colombia

Introducción

El cambio climático y el calentamiento global son fenómenos de bastante importancia en la actualidad ya que traen implícitos diferentes problemas para el bienestar de la sociedad, sus sistemas productivos y el equilibrio natural de los ecosistemas.

Estas temáticas, por ser consideradas como grandes amenazas para el futuro de la humanidad, están en una situación prioritaria de observación y desarrollo a nivel mundial y sobre ya ellas se vienen adelantando gran cantidad de estrategias y proyectos.

Dentro del marco de iniciativas mundiales, regionales y locales ante el cambio climático se pueden destacar varios ejemplos, como el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), la Conferencia de las Partes (Conference of the Parties, COP) y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que son los entes de mayor jerarquía para el trabajo con cambio climático.

Dentro de las iniciativas citadas anteriormente, se han creado una serie de subgrupos especializados en diversos componentes específicos, así como se han desarrollado diferentes temáticas para ser abordadas, esto con el fin de buscar una estandarización en las metodologías técnicas y el análisis de la información existente, así mismo, se ha fomentado la conformación de redes internacionales para un manejo más eficiente de las diferentes categorías establecidas y el aprovechamiento de la información que progresivamente se va generando.

En la búsqueda de herramientas modernas y confiables para la generación de información que pueda facilitar el trabajo de planificación ante diferentes escenarios esperados debidos al CCG muchos científicos han recurrido a trabajar con productos obtenidos a partir de procesos de teledetección. Estos datos pueden suministrar información temática clave para apoyar los proyectos e iniciativas que existen a nivel global con miras a identifi-

car, monitorear y realizar proyecciones prospectivas que permitirán realizar a futuro una mejor planificación de los recursos naturales afectados por estas causas.

En concordancia con las iniciativas de gran jerarquía y reconocimiento mundial y en el marco de las convocatorias de CYTED , algunas entidades de carácter investigativo en el área de la teledetección de España y Latinoamérica han unido esfuerzos para desarrollar una red temática que a lo largo de tres años de trabajo, ha realizado ejercicios académicos de difusión de conocimiento y trabajo metodológico para el monitoreo de diferentes áreas forestales iberoamericanas ante el cambio climático global. Esta red temática está conformada por :

- La Universidad de Extremadura (España).
- La Universidad de Castilla-La Mancha (España).
- La Universidad Autónoma de México (México).
- El Centro de Investigación y Desarrollo de Información Geográfica del IGAC (Colombia).
- La Fundación Agua (Ecuador).
- El Instituto de Investigaciones Forestales (Bolívia).
- La Universidad Juan Agustín Mazza (Argentina).

La red FORCLIM se ha desarrollado como una estrategia de cooperación científica Iberoamericana que busca estudiar y prever los efectos potenciales del cambio climático global mediante tres puntos claves:

- Intercambio de conocimiento sobre técnicas que permitan un estudio integral del fenómeno.
- Consolidación de medios y métodos para la identificación y caracterización de áreas de bosque actuales y futuras
- Difusión de la metodología idónea para el estudio de las distribuciones de bosque actuales y futuras mediante técnicas de modelado espacial.

Por su parte, como Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica del IGAC, el CIAF realiza la interacción de sus grupos temáticos relacionados con la Geomática, a generar, actualizar, integrar, difundir, aplicar y compartir los resultados de sus proyectos, mediante la transferencia de conocimientos, la asesoría, consultoría y la cooperación técnica. Tiene la responsabilidad de contribuir para que el IGAC logre "consolidarse como la entidad gubernamental productora y proveedora de información geográfica básica digital de alta calidad necesaria para el desarrollo integral y sostenible del país" y proveer el acceso a información geográfica básica. Su estructura funcional, en torno a la gestión de la información y el conocimiento sirve como apoyo a los procesos de planificación y desarrollo integral del país y la región.

El grupo de Percepción Remota, del cual hace parte el CIAF tiene por objetivo "Fomentar en el ámbito nacional el uso de las imágenes provenientes de sensores remotos para el estudio de los recursos naturales y la toma de decisiones en el marco de la planificación territorial, mediante la investigación, generación de propuestas metodológicas, capacitación, transferencia de tecnologías y la prestación de asesorías especializadas" (IGAC 2010).

Tiene como misión investigar sobre los avances científicos y tecnológicos de la percepción remota a nivel mundial, para su adopción a las condiciones de Colombia, promoviendo los proyectos de investigación con aplicación práctica, conjunta e interdisciplinaria entre las áreas técnicas del IGAC y otros grupos que pueden beneficiarse del uso de la información geoespacial y proyectando los resultados a través de la docencia, asesoría y consultoría. Su visión es consolidarse como un grupo líder con proyección internacional en investigación, desarrollo tecnológico e innovación en el campo de la percepción remota, para su aplicación a nivel de Colombia y de Latinoamérica y el Caribe, reafirmando la integración armónica entre la ciencia y la sociedad.

Dentro del grupo de Percepción Remota, se identificaron 36 áreas temáticas de aplicación de los sensores remotos en Colombia, las cuales se fundamentan en el Cambio Climático y el Ordenamiento Territorial. De igual manera busca desarrollar el desarrollo de nuevas líneas de producción cartográfica y abrir nuevos campos de aplicaciones con el fin de ampliar el conocimiento sobre los recursos naturales y sus complejas interrelaciones. Todo lo anterior orientado a apoyar al gobierno nacional en los procesos de toma las decisiones y actuar más acorde con la realidad del país y con miras hacia su desarrollo sostenible.

De acuerdo con estos puntos clave el grupo de Colombia en apoyo con los demás integrantes de la red ha adelantado el trabajo que a continuación se explica. Se espera que este trabajo sirva como ejemplo metodológico como base para establecer una estrategia de implementación de datos de sensores remotos para el estudio y monitoreo del efecto del cambio climático en los ecosistemas de Colombia.

Área de estudio

La República de Colombia está localizada en el extremo noroccidental del territorio suramericano y bordeada por el este con Venezuela y Brasil, al sur con Ecuador y Perú, al norte con el Océano Atlántico, al noroeste con Panamá y por el oeste con el Océano Pacífico. El país también comparte límites de su mar territorial con Jamaica, Haití, República Dominicana y los países centroamericanos de Honduras, Nicaragua y Costa Rica. Su superficie es de 2 070 408 km^2, de los cuales 1 141 748 km^2 corresponden a su

territorio continental y los restantes 928 660 km^2 a su extensión marítima. Consta de dos grandes zonas territoriales; una sumergida en el Océano Pacífico y el mar Caribe cubriendo un área aproximada de 828 660 km^2 y una segunda formada por las montañas de los Andes y las llanuras del oriente que comparte con Venezuela cubriendo aproximadamente 1 143 748 km^2 (Figura 1).

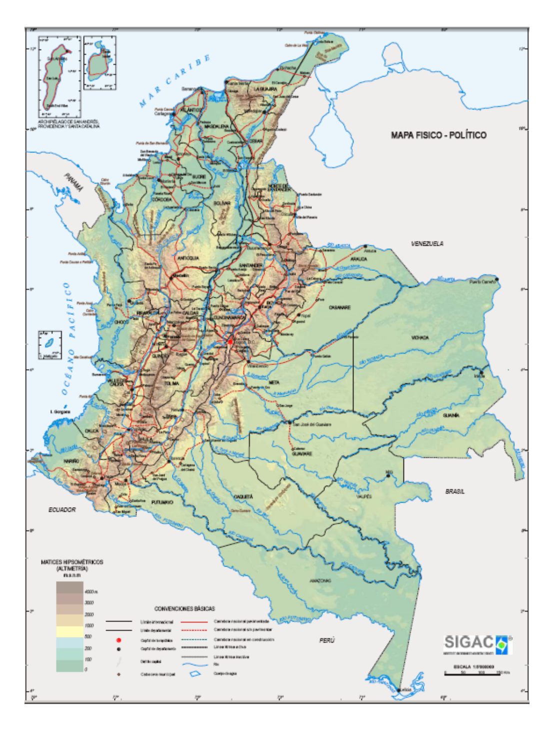


Figura 1. Mapa general de Colombia (Fuente: IGAC)

El territorio colombiano está dividido en una región plana al oriente y una región montañosa al occidente correspondiente a los Andes, donde a partir del nudo de los Pastos y el Macizo Colombiano, la Cordillera de los Andes se ramifica en tres secciones entre las cuales la Cordillera Occidental es moderadamente alta y corta en longitud en comparación con las otras dos, elevándose hasta los 4764 msnm del Volcán Cumbal. La Cordi-

llera Central, paralela a la costa del Océano Pacífico, incluye el Valle de Aburrá y forma numerosos picos y volcanes entre los que se destacan el Nevado del Huila (5700 msnm), el Nevado del Ruiz (5321 msnm), el Nevado del Tolima (5200 msnm), el Nevado de Santa Isabel (5150 msnm) y el Nevado el Cisne. Las cordilleras Central y la Oriental están separadas por el valle del río Magdalena, siendo la Oriental la más extensa. Sus picos, entre los que sobresale la Sierra Nevada del Cocuy, son moderadamente altos y contiene numerosas cuencas hidrográficas que desembocan en los ríos Magdalena, Amazonas y Orinoco.

La costa en el Océano Pacífico presenta estrechas llanuras que se encuentran con la Serranía del Baudó, una de las cadenas montañosas más bajas y estrechas de Colombia que bordean la zona de los Ríos Atrato y San Juan, formando parte de la zona llamada Chocó biogeográfico y con uno de los climas más lluviosos del mundo. En los Llanos Orientales que suponen cerca del 60% del área total del territorio colombiano, la única formación montañosa de importancia es la Serranía de la Macarena que se encuentra segregada del sistema montañoso andino. En esta región, que colinda con el Escudo Guayanés, predomina el terreno plano y semiondulado que hacia el sur presenta vegetación tupida de selva amazónica y al norte de una vegetación de tipo sabana.

Para el desarrollo del proceso metodológico inicialmente se trabajo con la capa de páramos oficial utilizada en el atlas nacional de paramos y el mapa de ecosistemas de Colombia (2007). El mapa fue realizado por el Instituto de Estudios Ambientales y Meteorológicos - IDEAM, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC, el Instituto Alexander von Humboldt – IAvH, el Instituto de Investigaciones ambientales del Pacífico - IIAP, el Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas - Sinchi y el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras – Invemar.

Para ejecutar el procedimiento se utilizó la capa de ecosistemas para todo el país, este mapa integra el territorio continental y marino de Colombia el sistema de coordenadas cartográficas Magna-Sirgas y a escala 1:500.000, con 36 hojas cartográficas. El mapa fue realizado incluyendo múltiples capas de información como geopedología, zonificación climática, coberturas de la tierra, geomorfología de fondos marinos y clima oceánico.

La metodología para la obtención del Mapa de ecosistemas consideró dos aproximaciones, una para los componentes continentales y costeros y otra para los marinos. El procedimiento general para la delimitación de ecosistemas continentales consistió en la integración de información de geopedología, zonificación climática y coberturas de la tierra, mediante procesos de análisis espacial y sistemas de información geográfica.

Para la elaboración del mapa de caracterización climática se empleó el mapa de clima que resulta de la intersección de los mapas fuente de temperatura y precipitación media anual. El desarrollo del mapa de geope-

dología consistió en la recopilación de información, el análisis y la interrelación de esta, el cambio del sistema de proyección de coordenadas, la incorporación de algunos elementos de la base cartográfica del IGAC. La metodología empleada para obtener la información de cobertura de la tierra, tuvo en cuenta el acuerdo interinstitucional sobre la leyenda, en cuanto a categorías y clases. A partir de la leyenda se hizo el procesamiento de las imágenes satelitales (Landsat TM y ETM+), las cuales tienen fechas de toma cercanas al año 2001, para cada una de las regiones en las que se subdividió el territorio nacional para este proceso. La elaboración de la cartografía comprende los procesos de preparación de fuentes de información, corrección geométrica de imágenes, captura de elementos cartográficos, edición y estructuración, control de calidad y salidas finales. Finalmente se integró un mapa nacional, que se tomó como fuente para generar las unidades de ecosistemas. Dentro del contexto de este proyecto se denominó capa de unidades síntesis a la integración vertical o superposición de las tres capas temáticas fundamentales: cobertura de la tierra, geopedología y zonificación climática. Esta integración estuvo a cargo del IDEAM, con el apoyo técnico de los demás institutos.

A partir de la capa de unidades síntesis se generó el Mapa de biomas, definido de acuerdo con características climáticas, geomorfopedológicas y por su ubicación dentro de una gran cuenca hidrográfica, mediante una agrupación de características geopedológicas, de provincias de humedad, zonificación hidrográfica y altitud. De acuerdo con esto, finalmente se obtuvo un número de 32 biomas, dentro de los tres grandes biomas, los cuales se presentan en los resultados del presente documento. Por otro lado, se establecieron además los biomas azonales, los cuales fueron reeditados manualmente, apoyándose en la literatura existente sobre la presencia de estos biomas en algunas regiones.

Desarrollo metodológico

La red temática originalmente programó dos actividades anuales presenciales, en donde se establecían tareas programadas cronológicamente para avanzar en los procesos de generación de información.

En los encuentros presenciales anuales se ha facilitado el intercambio de conocimiento sobre técnicas de modelamiento espacial prospectivo que otros países como España ya han utilizado.

Conforme a estas comunicaciones y las tareas programadas el grupo de percepción remota y aplicaciones geográficas se ha capacitado y se desarrollo el proceso de generación identificar y caracterizar áreas de bosques en escenarios climáticos actuales y futuros.

De acuerdo a lo anterior, a continuación se presenta la metodología utilizada y los resultados preliminares para modelar la distribución de los eco-

sistemas, mediante datos climáticos, datos procedentes de percepción remota y generación de modelos matemáticos y métodos estadísticos idóneos.

Para el modelamiento se emplearon los datos de los ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia y se determinó el área de distribución actual de los ecosistemas con el fin de obtener datos de presencia (Tabla 1).

Tabla 1. Ecosistemas definidos para realizar el desarrollo metodológico (en gris los no utilizados)

IDBI	BIOMA	C	IDECO	ECOSISTEMA
1	Zonobioma del desierto tropical de La Guajira y Santa Marta	31	131	Bosques naturales del zonobioma del desierto tropical de La Guajira y Santa Marta
2	Helobioma de La Guajira	31	231	Bosques naturales del helobioma de La Guajira
3	Zonobioma seco tropical del Caribe	31	331	Bosques naturales del zonobioma seco tropical del Caribe
4	Halobioma del Caribe	31	430	Manglar del Caribe
			431	Bosques naturales del halobioma del Caribe
5	Zonobioma alternohígrico y/o subxerofítico tropical del Alto Magdalena	31	531	Bosques naturales del zonobioma alterno hígrico y/o subxerofítico tropical del Alto Magdalena
8	Zonobioma húmedo tropical de la Amazonia y Orinoquia	31	831	Bosques naturales del zonobioma húmedo tropical de la Amazonia y Orinoquia
9	Helobiomas de la Amazonia y Orinoquia	31	931	Bosques naturales del helobioma Amazo-nia y Orinoquia
10	Peinobiomas de la Amazonia y Orinoquia	31	1031	Bosques naturales del peinobioma de la Amazonia y Orinoquia
11	Litobiomas de la Amazonia y Orinoquia	31	1131	Bosques naturales del litobioma de la Amazonia y Orinoquia
12	Zonobioma húmedo tropical del Pacífico y Atrato	31	1231	Bosques naturales del zonobioma húmedo tropical del Pacífico y Atrato
13	Helobiomas del Pacífico y Atrato	31	1331	Bosques naturales del helobioma Pacífico y Atrato
14	Halobiomas del Pacífico	31	1430	Manglar del Pacífico
			1431	Bosques naturales del halobioma del Pacífico
15	Zonobioma húmedo tropical del Magdalena y Caribe	31	1531	Bosques naturales del zonobioma húmedo tropical del Magdalena y Caribe
16	Helobiomas del Magdalena y Caribe	31	1631	Bosques naturales del helobioma Magda-lena y Caribe
17	Zonobioma húmedo tropical del Catatumbo	31	1731	Bosques naturales del zonobioma húmedo tropical del Catatumbo
18	Helobiomas del Río Zulia	31	1831	Bosques naturales del helobioma del río Zulia
19	Orobiomas bajos de los Andes	31	1931	Bosques naturales del orobioma bajo de los Andes
20	Orobiomas medios de los Andes	31	2031	Bosques naturales del orobioma medio de los Andes
21	Orobiomas altos de los Andes	31	2131	Bosques naturales del orobioma alto de los Andes

22	Orobiomas azonales de Cúcuta	31	2231	Bosques naturales del orobioma azonal de Cúcuta
24	Orobiomas azonales del Río Sogamoso	31	2431	Bosques naturales del orobioma azonal del río Sogamoso
25	Orobiomas azonales del Valle del Patía	31	2531	Bosques naturales del orobioma azonal del Valle del Patía
27	Orobioma de San Lucas	31	2731	Bosques naturales del orobioma de la serranía de San Lucas
28	Orobioma de La Macarena	31	2831	Bosques naturales del orobioma de La Macarena
29	Orobioma del Baudó y Darién	31	2931	Bosques naturales del orobioma de la serranía del Baudó y Darién
30	Orobioma bajo de Santa Marta y Macuira	31	3031	Bosques naturales del orobioma bajo de la Sierra Nevada de Santa Marta y Macuira
31	Orobioma medio de Santa Marta	31	3131	Bosques naturales del orobioma medio de la Sierra Nevada de Santa Marta
32	Orobioma alto de Santa Marta	31	3231	Bosques naturales del orobioma alto de la Sierra Nevada de Santa Marta
33	Bioma insular del Caribe	31	3331	Manglar de San Andrés y Providencia

Para la ejecución de los modelos, se empleó el programa MAXENT (Phillips et al., 2006), el cual es un método de clasificación que aplica el principio de máxima entropía para calcular la distribución geográfica más probable para una especie. MaxEnt estima la probabilidad de ocurrencia de la especie buscando la distribución de máxima entropía (lo más uniforme posible) sujeta a la condición de que el valor esperado de cada variable ambiental según esta distribución coincide con su media empírica. El resultado del modelo expresa el valor de idoneidad del hábitat para la especie como una función de las variables ambientales. Un valor alto de la función de distribución en una celda determinada indica que ésta presenta condiciones muy favorables para la presencia de la especie. MaxEnt puede utilizar variables cualitativas, otorgando a cada valor de la variable un peso relativo al número total de puntos de presencia que contiene. El programa proporciona las curvas de respuesta de la especie ante las distintas variables ambientales y estima la importancia de cada variable en la distribución de la especie.

Dicho programa requiere unos datos de presencia a modelar, unas variables climáticas y unas variables climáticas futuras. Para los datos de presencia, se obtuvo la distribución de los biomas del mapa de ecosistemas de Colombia para generar puntos aleatorios de presencias utilizando el software ArcGIS 9.3.1.

Para la obtención de las variables climáticas de los escenarios actuales potenciales, se trabajó con datos de precipitación y temperatura media anual para el mundo, obtenidos gratuitamente de Worldclim, los cuales son un conjunto de capas climáticas con una resolución de 1 km^2.

Para los escenarios futuros, se emplearon las capas desarrolladas por el CIAT sobre los siguientes modelos:

- El primer Modelo CCCMA (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis) - CGCM2 (The second generation coupled global climate model). En línea en: http://gisweb.ciat.cgiar.org/GCMPage/download_a2.html
- El segundo modelo es CSIRO (The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) – (Atmospheric Research Mark 2b climate model) MK2. En línea en: http://www.ipcc-data.org/is92/csiromk2_info.html
- El tercer modelo fue el: HCCPR (Hadley Centre for Climate Prediction and Research) - HADCM3 (Hadley Centre used the Unified Model (Cullen, 1993)). v3 este modelo se encuentra en línea en: http://www.ipcc-data.org/is92/hadcm2_download.html

En total fueron 22 capas de biomas que se tomaron (Ver Tabla 1 para capa de biomas y ecosistemas utilizados) y a cada capa temática se le generaron los escenarios reales actuales y los potenciales actuales. Posteriormente se generaron dos escenarios futuros, un escenario A2 y un escenario B2 con las capas del CIAT.

El IPCC SRES ha desarrollado nuevos escenarios de emisión denominados "SRES scenarios". Los escenarios de emisión son representaciones de futuras de emisiones basado en factores externos como demografía, desarrollo socio-económico y cambio tecnológico y sus clases de relaciones. Los escenarios SRES comprenden 4 familias: A1, A2, B1 yB2 (Ruiz-Murcia 2010).

Los escenarios A2 describen un mundo muy heterogéneo, con una población en continuo crecimiento donde el desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

Los escenarios B2 describen un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Su población aumenta pero a un ritmo menor que en A2, con un nivel de desarrollo económico intermedio y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en la líneas evolutivas A1 y B1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se enfoca en niveles locales y regionales.

Para cada capa fue recortada al área efectiva de Colombia, aunque no fue posible recortar exactamente la forma del límite geográfico colombiano. Por eso se observan salidas graficas que modelan zonas de Venezuela y Panamá. El programa arroja un enlace http donde se pueden observar los estadísticos y modelos arrojados y capas de los modelos.

Para comparar la capacidad de discriminación de los distintos modelos se emplea la técnica del área bajo la curva ROC, la cual es procedente del procesamiento de señales de radar y que ha sido aplicada en la evaluación de modelos de distribución basados en algoritmos de presencia-ausencia y en algoritmos de solo presencia (Phillips et al., 2006).

La construcción de la curva ROC es un proceso iterativo aplicado a cada umbral de idoneidad del modelo, que consiste en un modelo de distribución que se reclasifica en dos categorías a partir del umbral, para obtener un modelo binario, en el que los valores del modelo original inferiores al umbral indican ausencia y los valores iguales o superiores al umbral indican presencia. Se obtiene una curva del intercambio entre las tasas de los falsos negativos y falsos positivos, para cada valor de corte (Phillips et al., 2006).

El área bajo la curva ROC (AUC) indica, para un punto de presencia y uno aleatorio seleccionados al azar, la probabilidad de que el valor de idoneidad previsto por el modelo para el punto de presencia sea mayor que el previsto para el punto aleatorio. Es una medida directa de la capacidad de discriminación del modelo, que toma valores próximos a 1 cuando existe un buen ajuste con los datos de evaluación y cercanos a 0.5 cuando el ajuste no es mejor que el obtenido por azar (Phillips et al., 2006).

Para realizar este procedimiento se observó el archivo resultante de Maxent y se analizó la grafica *sensitivity* vs. 1-*specificity* donde se observa desde el punto de cruce de los ejes X y Y posición (0,0; 1,0) parte superior izquierda, la distancia euclidiana más cercana a la curva. El modelo se rechaza al no presentar un buen ajuste (debajo de 0,7 se tomó entonces valores de 0,65 del valor de training data AUC o test data AUC como mínimo para el corte y generación de cartografía). Adicional a eso se analizaron los datos de la tabla arrojada por Maxent (se encuentra bajo esta curva) y se observa el valor correspondiente a "Equal training sensitivity and specificity" que es el valor de equilibrio entre estas dos variables.

Se generó la cartografía temática resultante convirtiendo a grid los resultados del ascii de Maxent (0 = no data; 1 = potencial actual; 2 = actual real) y se creó el área de distribución real en formato GRID a partir del mapa de ecosistemas para los 22 biomas (Ver tabla 1) con resolución de 1 km para subir a web.

Resultados

Se presentan a continuación los biomas que se modelaron para los diferentes escenarios y modelos climáticos para los escenarios A2 y B2 y que están disponibles en la página web. Allí es posible escoger el bioma, realizar acercamientos, sobreponer diferentes capas, ver cada modelo y realizar comparaciones (Figura 2).

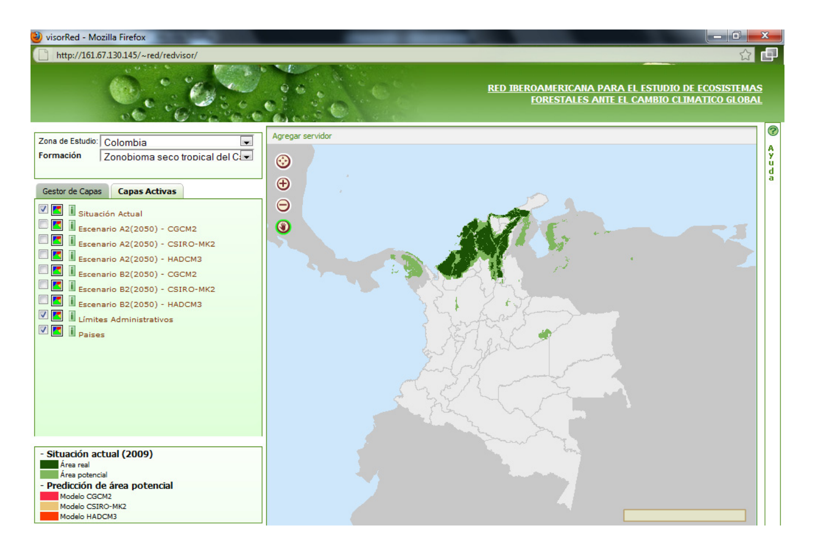


Figura 2. Visualización de los resultados en el enlace de la red.

Los biomas presentados pertenecen a dos grandes biomas el Gran Bioma de Bosque Seco Tropical y el Gran Bioma Del Bosque Húmedo Tropical.

Gran bioma de bosque seco tropical

Zonobioma seco tropical del Caribe

Este bioma se caracteriza por encontrarse en zonas de clima cálido seco (91%) y cálido muy seco (9%), las cuales están sobre lomeríos estructurales y fluviogravitacionales (56%), piedemontes aluviales y coluvio-aluviales (22%) y planicies aluviales, fluviomarinas y eólicas (20%), donde predominan las coberturas de la tierra de pastos (61%), vegetación secundaria (13%), áreas agrícolas heterogéneas (9%) y arbustales (7%).

Según el escenario potencial para este bioma, existen zonas que por sus condiciones podrían incrementar esta cobertura, incluso muestra zonas al sur que no corresponden a este bioma, sin embargo, para los modelos futuros la tendencia de este bioma es a decrecer. El modelo que muestra menor perdida de cobertura es el CGCM2 (Figura 3).



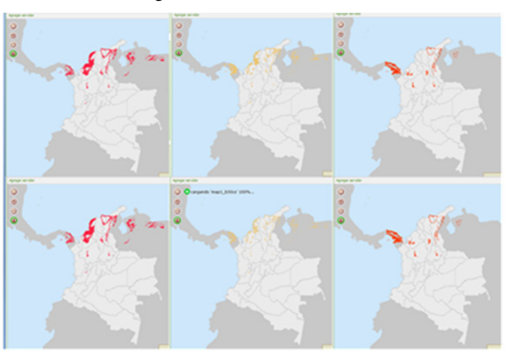


Figura 3. Escenario actual (verde oscuro) y potencial (verde claro) a la izquierda. Escenarios A2 para los modelos CGCM2, CSIRO-MK2, HADCM3 (derecha arriba) y los escenarios B2 (derecha abajo) para el Zonobioma seco tropical del Caribe.

Halobioma del Caribe

En este halobioma predominan los climas cálido muy seco (52%) y cálido seco (37%), y en algunos sectores se presenta un clima cálido árido (9%). Este halobioma yace en geoformas de planicies fluviomarinas y, en general, está cubierto de bosques naturales (28%), lagunas costeras (23%), pastos (13%), zonas desnudas (10%), vegetación secundaria (6%) y cobertura de hidrofitia continental (4%). Estas coberturas ocupan el 85% del área del halobioma.

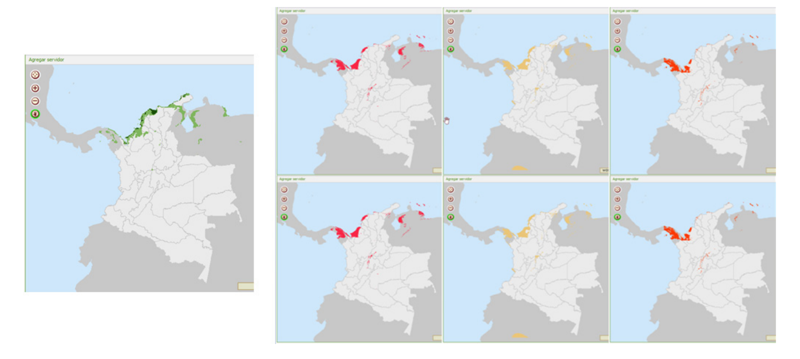


Figura 4. Escenario actual (verde oscuro) y potencial (verde claro) a la izquierda. Escenarios A2 para los modelos CGCM2, CSIRO-MK2, HADCM3 (derecha arriba) y los escenarios B2 (derecha abajo) para el Halobioma del Caribe.

El área potencial que muestra el modelo actual y futura, es bastante mayor que la existente, sin embargo hay zonas reales que no se muestran en los modelos, entre escenarios no se observaron cambios significativos y cada modelo climático muestra zonas potenciales diferentes, siendo el SCIRO el que mayor área otorga. Al ser estas zonas cálidas podría esperarse que a futuro incrementen su cobertura, especialmente aquellas desérticas (Figura 4.).

Gran bioma del bosque húmedo tropical

Zonobioma húmedo tropical del Catatumbo

Con climas cálidos muy húmedos (62%) y cálidos húmedos (37%), este zonobioma se encuentra sobre las unidades geomorfológicas lomerío estructural erosional (48%), valle aluvial (34%) y piedemonte coluvio-aluvial (10%). En cuanto a la cobertura de la tierra se localizan bosques naturales (49%), pastos (21%) y áreas agrícolas heterogéneas (19%), principalmente.

Este bioma se ubica sobre una pequeña zona del departamento del Cesar, en el que el escenario potencial muestra mayor área que la real, pero los modelos futuros muestran una tendencia a disminuir su cobertura incluso a mostrar la desaparición de este bioma para el modelo HADCM3 (Figura 5).

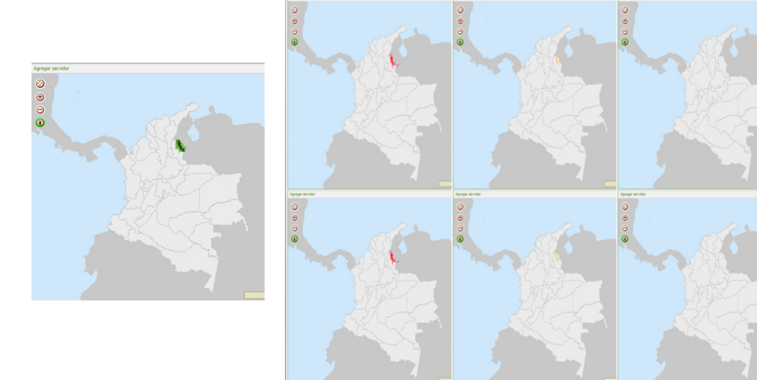


Figura 5. Escenario actual (verde oscuro) y potencial (verde claro) a la izda. Escenarios A2 para los modelos CGCM2, CSIRO-MK2, HADCM3 (derecha arriba) y los escenarios B2 (derecha abajo) para el Zonobioma húmedo tropical del Catatumbo.

Orobiomas altos de los Andes

Este orobioma abarca una extensión de 4.178.394 ha y en él confluyen climas muy frío seco (60%), muy frío húmedo (15%), extremadamente frío seco (12%) y muy frío y muy seco (9%). El 97% del área del orobioma se extiende en unidades geomorfológicas de montaña, del cual el 41% se encuentra en montaña estructural erosional, el 32% en montaña fluviogravitacional y el 27% en montaña glaciárica. En el orobioma andino predominan las siguientes coberturas de la tierra: herbazales (25%), bosques naturales 23%), arbustales (20%), pastos (13%), áreas agrícolas heterogéneas (9%) y cultivos anuales o transitorios (5%).

Igualmente, se observa un incremento en la cobertura potencial en relación con la real y los modelos futuros presentan en algunas zonas incrementos de cobertura y en otras disminución. Este tipo de bioma es de gran importancia ya que en él se presenta los ecosistemas de páramo, fundamentales para la conservación del recurso hídrico del país y únicos a nivel mundial (Figura 6).

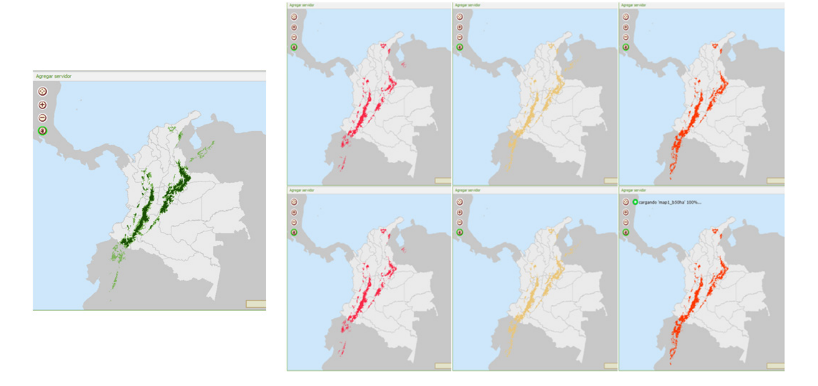
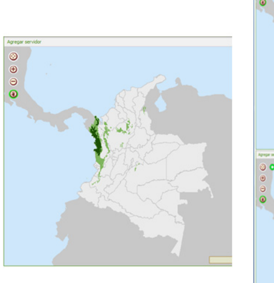


Figura 6. Escenario actual (verde oscuro) y potencial (verde claro) a la izda. Escenarios A2 para los modelos CGCM2, CSIRO-MK2, HADCM3 (derecha arriba) y los escenarios B2 (derecha abajo) para los Orobiomas altos de los Andes.

Orobioma del Baudó-Darién

Los climas que se dan en el orobioma de la serranía del Baudó-Darién son cálido muy húmedo (87%) y cálido húmedo (11%). El 62% del área del orobioma se encuentra sobre montaña estructural erosional y el 38%, sobre montaña fluvio-gravitacional. En el orobioma de la serranía del Baudó-Darién predominan las siguientes coberturas de la tierra: bosques naturales (72%) y vegetación secundaria (23%).

El modelo muestra zonas potenciales en donde no se presenta este tipo de bioma como por ejemplo hacia el centro del país, ya que se localiza únicamente hacia la zona occidental en el Chocó. Cada modelo climático arroja zonas diferentes, siendo el CSIRO el que más cobertura aumenta (Figura 7).



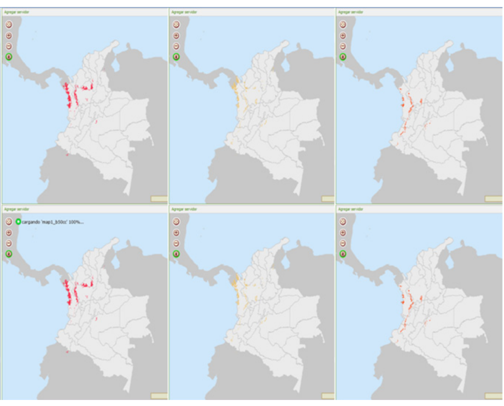


Figura 7. Escenario actual (verde oscuro) y potencial (verde claro) a la izda. Escenarios A2 para los modelos CGCM2, CSIRO-MK2, HADCM3 (derecha arriba) y los escenarios B2 (derecha abajo) para el orobioma del Baudó-Darién.

Orobioma de San Lucas

Los climas que se dan en este orobioma son: templado húmedo (27%), cálido muy húmedo (27%), cálido húmedo (26%) y cálido seco (9%). El 87% del área del orobioma se ubica sobre la unidad geomorfológica de montaña fluviogravitacional y el 13%, en montaña estructural erosional. Predominan las siguientes coberturas de la tierra: bosques naturales (68%), vegetación secundaria (18%) y pastos (12%).

Para este bioma, el escenario HADCM3 muestra una disminución en cobertura para el escenario A2 y desaparición para el escenario B2. Al igual que en modelos anteriores, el modelo potencial muestra un incremento de las coberturas y variaciones en área según cada modelo climático (Figura 8).



Figura 8. Escenario actual (verde oscuro) y potencial (verde claro) a la izda. Escenarios A2 para los modelos CGCM2, CSIRO-MK2, HADCM3 (derecha arriba) y los escenarios B2 (derecha abajo) para el Orobioma de San Lucas.

Orobioma de la Macarena

Este orobioma presenta climas cálido húmedo (63%), cálido muy húmedo (13%), templado húmedo (13%) y templado muy húmedo (12%). El 63% del área del orobioma está en la unidad geomorfológica de montaña estructural erosional, el 27% sobre montaña fluviogravitacional y el 10% sobre lomeríos estructurales erosionales. Predominan las siguientes coberturas de la tierra: bosques naturales (72%), arbustales (19%) y herbazales (5%).

Este bioma ocurre únicamente hacia la zona conocida como la serranía de La Macarena. La tendencia general con los modelos climáticos es al decrecimiento especialmente en el modelo CGCM (Figura 9).

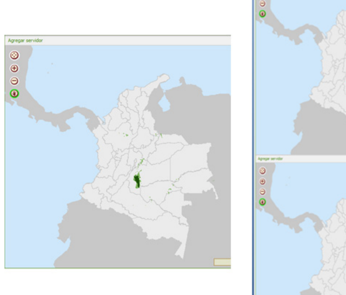




Figura 9. Escenario actual (verde oscuro) y potencial (verde claro) a la izda. Escenarios A2 para los modelos CGCM2, CSIRO-MK2, HADCM3 (derecha arriba) y los escenarios B2 (derecha abajo) para el Orobioma dela Macarena.

Orobioma bajo de Santa Marta y Macuira

Este orobioma abarca una extensión de 994.633 ha y en él se dan climas cálido seco (35%), templado seco (28%), cálido árido (15%) y templado húmedo (13%). El 69% del área del orobioma está ubicado sobre la unidad geomorfológica de montaña fluviogravitacional y el 31% sobre montaña estructural erosional. En este orobioma predominan las siguientes coberturas de la tierra: vegetación secundaria (33%), bosques naturales (32%), pastos (14%), arbustales (8%) y herbazales (7%).

Asimismo, se presenta un incremento en zonas donde no corresponde este bioma y en todos los modelos climáticos desaparece la zona de la Macuira hacia el nor-oriente del país y el escenario HADCM3 es el que pronostica una mayor pérdida de cobertura, especialmente hacia las zonas de la sierra Nevada de Santa Marta. Ambas zonas son de gran importancia para el país por ser ecosistemas únicos y porque abastecen de agua a gran cantidad de municipios (Figura 10).



Figura 10. Escenario actual (verde oscuro) y potencial (verde claro) a la izda. Escenarios A2 para los modelos CGCM2, CSIRO-MK2, HADCM3 (derecha arriba) y los escenarios B2 (derecha abajo) para el Orobioma bajo de Santa Marta y Macuira.

Helobioma del Pacífico y el Atrato

Este helobioma se caracteriza por presentar tres tipos de clima: cálido muy húmedo (74%), cálido húmedo (14%) y cálido pluvial (12%). El área que abarca este helobioma se encuentra principalmente sobre las unidades geomorfológicas planicie aluvial (75%) y valle aluvial (13%). Está cubierto predominantemente por bosques naturales (34%), vegetación secundaria (22%), cobertura de hidrofitia continental (15%), áreas agrícolas heterogéneas (12%) y aguas continentales naturales (6%).

De igual manera a los casos anteriores, el escenario potencial muestra zona donde puede ocurrir este bioma, pero que presenta una disminución en cuanto a la real en parte debido a la intervención que se ha dado en esta zona. El modelo CGCM2 es el que mayor área proyecta y el HADCM3 el más pesimista (Figura 11).

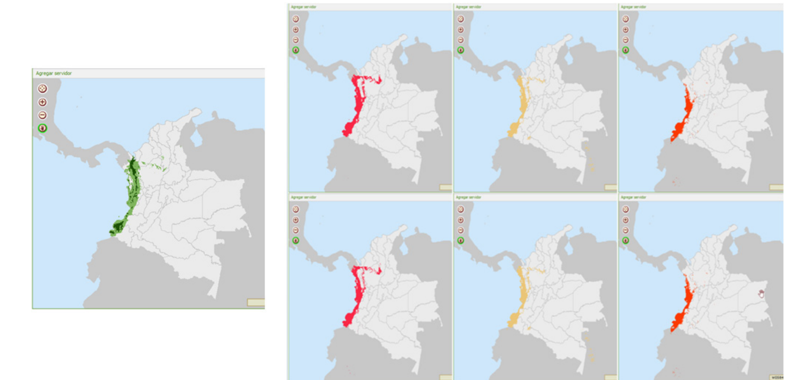


Figura 11. Escenario actual (verde oscuro) y potencial (verde claro) a la izda. Escenarios A2 para los modelos CGCM2, CSIRO-MK2, HADCM3 (derecha arriba) y los escenarios B2 (derecha abajo) para el Helobioma del Pacifico y el Atrato.

Halobioma del Pacifico

Este halobioma se caracteriza por reflejar los siguientes tres tipos de clima: cálido muy húmedo (64%), cálido pluvial (25%) y cálido húmedo (10%). El 100% del área que abarca este halobioma se encuentra sobre la unidad geomorfológica de planicie aluvial. La cobertura de la tierra de este halobioma está constituida por bosques naturales (73%), vegetación secundaria (12%) y lagunas costeras (8%).

El escenario potencial muestra zonas donde puede ocurrir este bioma, pero que presenta una disminución y desaparición en cuanto a la real. El modelo CGCM2 es el que mayor área proyecta y el HADCM3 el que muestra menor cobertura (Figura 12).

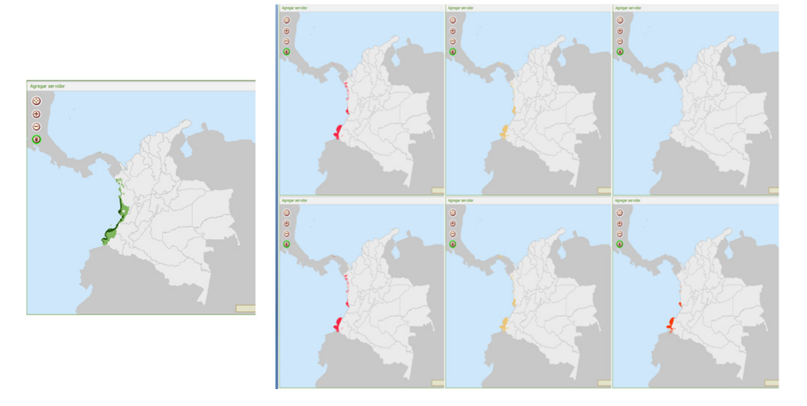
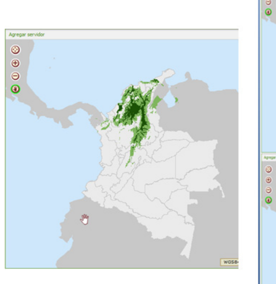


Figura 12. Escenario actual (verde oscuro) y potencial (verde claro) a la izda. Escenarios A2 para los modelos CGCM2, CSIRO-MK2, HADCM3 (derecha arriba) y los escenarios B2 (derecha abajo) para el halobioma del Pacifico.

Helobioma del Magdalena y Caribe

En este helobioma se dan tres tipos de climas: cálido seco (46%), cálido muy húmedo (41%) y cálido húmedo (8%). El área que abarca se encuentra principalmente sobre planicies aluviales (77%) y valle aluvial (21%). Las coberturas de la tierra predominantes son pastos (32%), aguas continentales naturales (18%), cobertura de hidrofitia continental (11%) y vegetación secundaria (11%), cultivos anuales o transitorios (10%) y bosques naturales (8%).

Este modelo es el que a futuro presenta una de las mayores extensiones de su área para los tres modelos climáticos, siendo el CSIRO-MK2 el que mayor área proyecta y el HADCM3 el que menos. Es de gran importancia esta zona por ser de tipo aluvial, por lo que los efectos del cambio climático podrían ser mayores en términos de inundaciones o sequias hacia estas zonas (Figura 13).



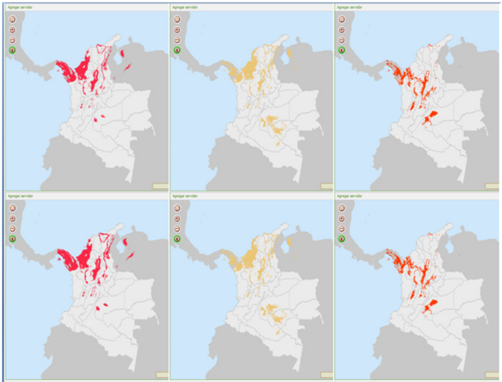


Figura 13. Escenario actual (verde oscuro) y potencial (verde claro) a la izda. Escenarios A2 para los modelos CGCM2, CSIRO-MK2, HADCM3 (derecha arriba) y los escenarios B2 (derecha abajo) para el helobioma del Magdalena y Caribe.

Orobiomas azonales de Cúcuta

Este orobioma se caracteriza por presentar dos tipos predominantes de clima: cálido seco (76%) y cálido muy seco (23%). El área que abarca el orobioma azonal de Cúcuta se encuentra sobre tres unidades geomorfológicas: montaña erosional estructural (58%), lomerío estructural erosional (16%), planicie aluvial (12%) y valle aluvial (12%). Predominan las siguientes coberturas vegetales en este orobioma: pastos (35%), vegetación secundaria (31%), áreas agrícolas heterogéneas (9%), áreas urbanas (8%), arbustales (6%) y bosques naturales (5%). Al ser un bioma tan pequeño, las predicciones muestran su tendencia a la desaparición y el modelo potencial no aumenta significativamente el área efectiva que ocupa actualmente (Figura 14).



Figura 14. Escenario actual (verde oscuro) y potencial (verde claro) a la izda. Escenarios A2 para los modelos CGCM2, CSIRO-MK2, HADCM3 (derecha arriba) y los escenarios B2 (derecha abajo) para los orobiomas azonales de Cúcuta.

Orobioma medio de Santa Marta

Con una extensión de 174.149 ha, este orobioma presenta climas frío húmedo (44%), frío muy húmedo (42%) y frío seco (14%). El 79% del área del orobioma se encuentra en la unidad geomorfológica de montaña fluviogravitacional, el 17% sobre montaña estructural erosional y un 4% sobre montaña glaciárica. Predominan las siguientes coberturas de la tierra: bosques naturales (59%), áreas agrícolas heterogéneas (20%), herbazales (11%) y pastos (5%).

Para este bioma, el modelo climático CSIRO-MK2 es el único que arroja la probabilidad que se conserve bajo un escenario futuro. De igual manera, se presenta muy poco incremento del modelo potencial en cuanto al real (Figura 15).



Figura 15. Escenario actual (verde oscuro) y potencial (verde claro) a la izda. Escenarios A2 para los modelos CGCM2, CSIRO-MK2, HADCM3 (derecha arriba) y los escenarios B2 (derecha abajo) para el orobioma medio de Santa Marta.

Orobioma alto de Santa Marta

Este orobioma abarca una extensión de 157.621 ha y cuenta con climas extremadamente frío seco (40%), muy frío seco (36%), muy frío húmedo (15%) y nival seco (7%). El 79% del área del orobioma está sobre la unidad geomorfológica de montaña glaciárica, y el 20% en montaña fluviogravitacional. En este orobioma predominan las siguientes coberturas de la tierra: herbazales (71%), bosques naturales (10%), arbustales (10%) y zonas desnudas (sin o con poca vegetación) (5%).

Para este bioma, el modelo climático CSIRO-MK2 en el escenario A2 es el único que arroja la probabilidad que se conserve bajo un escenario futuro de cambio climático, para los demás este tiende a desaparecer. De igual manera, se presenta muy poco incremento del modelo potencial en cuanto al real (Figura 16).





Figura 16. Escenario actual (verde oscuro) y potencial (verde claro) a la izda. Escenarios A2 para los modelos CGCM2, CSIRO-MK2, HADCM3 (derecha arriba) y los

Análisis de los resultados y discusión

Este documento presenta un avance de las actividades realizadas para la red temática FORCLIM. El objetivo principal de la red proyecta estudiar y prever los efectos potenciales del cambio climático global mediante tres puntos claves: intercambio de conocimiento sobre técnicas que permitan un estudio integral del fenómeno, consolidación de medios y métodos para la identificación y caracterización de áreas de bosque actuales y futuras y difusión de la metodología idónea para el estudio de las distribuciones de bosque actuales y futuras mediante técnicas de modelado espacial. De acuerdo a este objetivo el grupo de Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas (PR y AG) del Instituto Geográfico Agustín Codazzi ha adelantado actividades en cuanto a los tres puntos que plantea el objetivo.

Mediante las comunicaciones con la red y los diferentes encuentros anuales se ha facilitado el intercambio de conocimiento sobre técnicas que otros países como España ya han utilizado. Esto es un avance para estudiar la dinámica de distribución de los ecosistemas de bosque frente al cambio climático global en Colombia. Conforme a estas comunicaciones el grupo PR y AG se ha capacitado y está en el proceso de consolidación de la metodología para identificar y caracterizar áreas de bosques en escenarios climáticos actuales y futuros. Como consecuencia de esto, se han obtenido estos resultados.

La Red Temática propuesta parte de su experiencia actual en técnicas de análisis espacial y estudio de la diversidad biológica para intercambiar conocimiento, consolidar medios y métodos y difundir técnicas de estudio de este fenómeno en un marco de apertura a la sociedad. En este sentido, datos, métodos, resultados y documentación serán públicos y se potenciará el uso de herramientas de software libres. Los resultados esperados son la consolidación de una línea de trabajo con métodos estandarizados aplicable al análisis del problema central de la línea de investigación y utilizable por cualquier grupo u organización incluyendo a los países participantes.

Recientemente se esta desarrollando una serie de técnicas aplicadas a la generación de modelos de distribución de especies y más específicamente a la modelación de esta distribución y los efectos de los cambios en aquellas variables que determinan la presencia de la especie. Esto gracias al creciente desarrollo tecnológico de los sistemas, la difusión y acceso a la geoinformación y al avance en tecnologías geomáticas, especialmente en sensores remotos que son el insumo principal de base, lo cual permite que los modelos sean cada vez más robustos en sus predicciones y admiten incluir mayor cantidad de atributos. Estos modelos, son de vital importancia ya que son insumo para los tomadores de decisión en conservación y manejo, determinar posibles zonas de presencia de especies des-

conocidas o evaluar el impacto del cambio climático global sobre la distribución de los organismos (Lawler et al., 2006, Ruiz-Murcia 2010).

Los modelos de distribución de especies indican la idoneidad o aptitud del hábitat para el desenvolvimiento optimo de las poblaciones de una especie particular o de las comunidades, calculada a partir de observaciones de campo y una serie de variables ambientales que actúan como predictoras o covariables (Phillips et al. 2006).

La creciente disponibilidad de grandes datos de presencia de las especies, especialmente proveniente de colecciones biológicas de museos, ha promovido la exploración de métodos que no requiere de datos de ausencia de las especies considerando que no están disponibles en dichas bases de datos y que son dispendiosos de colectar. Los métodos de modelamiento de presencias solo requieren de un juego de ocurrencias conocidas junto con unas variables predictoras como topografía, clima, suelos, biogeografía y sensores remotos (Phillips y Dudík 2008).

Los modelos de distribución basados en presencia-ausencia habitualmente se evalúan utilizando una muestra de evaluación independiente de la utilizada para entrenar los modelos, compuesta por registros de presencia-ausencia independientes de los utilizados para el entrenamiento de los algoritmos. A partir de esta muestra de evaluación se pueden calcular los errores de los casos que están correctamente clasificados, es decir aquellas presencias que son verdaderos positivos cuando el modelo predice presencia y ésta es confirmada por las presencias de la muestra de evaluación. Asimismo, se pueden calcular los verdaderos negativos cuando el modelo predice ausencia y ésta es confirmada por las ausencias de la muestra de evaluación. Por otro lado, se pueden calcular aquellos casos que son erróneamente clasificados, como las presencias que son falsos positivos cuando el modelo predice presencia y la muestra indica ausencia, en este caso se habla de errores de comisión. Se pueden calcular las ausencias que son falsos negativos cuando el modelo predice ausencia y la muestra indica presencia, en este caso se habla de errores de omisión. Estos datos se tabulan en una matriz de confusión a partir de la cual se pueden calcular distintos índices de evaluación (Phillips et al., 2006, De-Pando y Peñas de Giles 2007).

Un modelo de idoneidad no representa necesariamente la distribución real de la especie sino la distribución potencial ya que identifica las zonas que por sus características son potencialmente adecuadas para la presencia de la especie. Sin embargo existen otros factores que pueden influir fuertemente en los resultados obtenidos en el modelo como la existencia de factores limitantes no previstos en el modelo (Phillips et al., 2006).

Para Colombia se han desarrollado diferentes modelos de cambio climático, el IDEAM, presenta una idea conceptual sobre escenarios de cambio climático y describe las características físicas que involucran los modelos

regionales y globales de escenarios que están siendo usados en el país, presentando los resultados de lluvia para clima presente y clima futuro bajo el escenario de cambio climático A1B obtenido del modelo global japonés de alta resolución. En particular, en este trabajo se da una idea conceptual sobre escenarios de cambio climático, en forma breve, se describen las características físicas de los modelos de los escenarios de cambio climático que están siendo usados en el país como PRECIS de Reino Unido junto con el JMAGSM del Japón y, se presentan resultados de lluvia para el clima futuro bajo el escenario de cambio climático A1B obtenido del modelo global japonés de alta resolución.

También se han empleado diferentes modelos regionales como el PRECIS y el GSM-MRI que han modelado el comportamiento de la temperatura, la precipitación y humedad relativa para varios escenarios hasta el 2100. En ellos es posible visualizar zonas con incrementos en cada una de las variables y que zonas en particular presentan dicha modificación

Estos modelos son muy robustos en cuanto a las predicciones que arroja, sin embargo, las predicciones de idoneidad para Maxent han demostrado presentar una elevada confiabilidad para determinar escenarios de idoneidad y relación entre variables, conociendo cual de ellas aporta más al modelo. Sin embargo, es importante considerar que el modelo fue diseñado para determinar nicho fundamental de las especies, por lo que hay que tener en cuidado con los resultados que arroja para cobertura. En este caso quisimos conocer como es el comportamiento usando modelos climáticos ya empleados en otros trabajos, partiendo del supuesto que las especies que modelamos no sobrepasan los limites de los ecosistemas modelados, por lo cual podemos obtener una aproximación al comportamiento de la vegetación en general.

Igualmente estos resultados podrían mostrar zonas que potencialmente podrían ocupar los biomas, zonas que por ejemplo por intervención antrópica han cambiado su cobertura y aquellas que debido al cambio climático global se perderían, especialmente aquellas que ocupan menor área en el país y cuya pérdida es indeseable. Asimismo, es importante considerar que no todos los biomas mostraron un valor de ajuste a los modelos según el valor ROC, y que tuvieron que ser rechazados en parte debido al tamaño de la zona y la cantidad de puntos de presencia que se generaron para cada uno.

Para los modelos climáticos, cada uno presento diferencias que varían según el tipo de bioma, unos se mostraron más pesimistas que otros y dependiendo del escenario. Los modelos potenciales en la mayoría de los casos mostraron un aumento en el área que podría ocupar ese bioma, sin embargo en muchos casos predijo zonas que no corresponderían potencialmente. Por otro lado, mostró casos donde el bioma desaparecería bajo

un escenario futuro, sin embargo no se presentaron diferencias entre cada tipo de escenario, lo cual es un aspecto importante a considerar.

Entre muchos otros aspectos, la desaparición de cualquier tipo de ecosistema puede acarrear un desbalance en los procesos y dinámicas que se dan al interior de ellos, que ponen en peligro el bienestar de la sociedad y de las comunidades bióticas. La reducción del área de distribución actual respecto al área de distribución potencial se debe a un conjunto complejo de factores, tanto abióticos como bióticos. Entre los primeros están los factores topográficos, geológicos y climáticos y entre los segundos la competencia interespecífica o la capacidad de dispersión.

La intensidad y localización de estas modificaciones son desconocidas, pero su repercusión en las economías locales y en la diversidad biológica son previsiblemente importantes. Si el CCG continúa, la única forma de mitigar sus efectos es determinar las zonas de cambio y la intensidad del mismo, conocimiento que insumos servirían para plantear directrices sobre políticas de conservación, prospección y estudio, así como para priorizar actuaciones en planes de gestión a medio y largo plazo.

Los resultados esperados son la consolidación de una línea de trabajo con métodos estandarizados aplicable al análisis del problema central de la línea de investigación y utilizable por cualquier grupo u organización incluyendo a los países participantes.

Los bosques de Colombia ante el cambio climático

Ángel M. Felicísimo, Fernando Berenguer

Contacto:
amfeli@unex.es
Grupo Kraken
http://www.unex.es/investigacion/grupos/kraken/
Universidad de Extremadura, España

Prefacio y justificación

En la Red FORCLIM se elaboraron proyectos para cada país integrante de la misma. Paralelamente se realizaron otros trabajos académicos bajo la forma de Proyectos Fin de Carrera que, en algunos casos, aportan información complementaria a la proporcionada por los estudios principales. En estos proyectos se han incluido técnicas diferentes de visualización de datos o combinaciones distintas de escenarios/modelos, por lo que hemos considerado de interés incluir algunos en esta serie de libros.

Los estudios de mayor interés han sido los relativos a Colombia y México, realizados por alumnos de la titulación Ingeniería en Geodesia y Cartografía: Fernando Berenguer Sempere en el caso de Colombia y Epifanio Mateos Ucedo en el caso de México. Ambos proyectos han estado dirigidos por Ángel M. Felicísimo que ha intervenido también en el diseño, realización y escritura de los mismos.

Los resultados obtenidos justifican la inclusión de estos estudios aunque hayan sido realizados de forma complementaria a los de la Red FORCLIM. En este sentido, nuestro agradecimiento a los organismos que han cedido la información básica en formato digital, como es el caso del Instituto Geográfico Agustín Codazzi de Colombia, ya que sin el mapa de ecosistemas no hubiera sido posible realizar este trabajo.

Introducción

La biodiversidad o diversidad biológica se suele definir como la variabilidad entre los organismos vivientes así como la de los complejos ecológicos de los que forman parte incluyendo por tanto la diversidad dentro de las especies, entre especies y de ecosistemas. El término comprende, por tanto, diferentes escalas biológicas: la variabilidad en el contenido genético de los individuos y de las poblaciones, el conjunto de especies que

integran grupos funcionales y comunidades completas y el conjunto de comunidades de un paisaje o región.

La biodiversidad no tiene una distribución uniforme a lo largo del planeta. De hecho existen grandes diferencias con amplias zonas donde la biodiversidad es moderada y otras donde alcanza valores muy elevados. En este contexto, Norman Myers propuso el término *hotspot* (Myers 1988) para definir lugares donde existe una excepcional concentración de diferentes especies con un alto grado de endemismo y que, simultáneamente, están sufriendo una regresión por causas diversas aunque normalmente lo es por la destrucción de sus condiciones naturales.

Myers hace énfasis en que ni la biodiversidad ni la extinción son uniformes en el espacio ni en el tiempo y que las zonas más afectadas a nivel global son los bosques tropicales. Por tanto, los esfuerzos de estudio y conservación deben aplicarse prioritariamente a estas áreas donde confluyen riqueza biológica y amenaza de extinción.

El área de estudio de este trabajo está en una de las zonas de mayor biodiversidad de la tierra. Estimaciones relativamente recientes proponen que el número total de especies de plantas con flores ya conocidas en el mundo es de unas 420.000, de las que 100.000 crecerían en Sudamérica. Las mismas estimaciones hablan de 60.000 especies en los países andinos tropicales, de las que alrededor de 28.000 serían endémicas. El mayor número corresponde al tándem Brasil-Colombia.

Como otros muchos "puntos calientes", la región andino-tropical ha sufrido una gran pérdida de hábitats naturales, hasta el punto de que en la actualidad sólo un 25% de la vegetación podría considerarse original. Su estudio y el posible impacto del cambio climático sobre ellos es, por tanto, una cuestión de enorme interés teniendo en cuenta que, además de los problemas habituales aparece una nueva amenaza: el cambio climático (Corvalan, Hales, y McMichael 2005).

El presente trabajo se encuadra en este contexto y muestra métodos y resultados aplicados al estudio de grandes comunidades (biomas) y de su potencial vulnerabilidad ante diversos escenarios de cambio climático. Este ámbito complementa los trabajos clásicos que se realizan sobre la diversidad de especies, la unidad básica de la biodiversidad y entendemos que resulta necesario porque aporta una visión mucho más global sobre el estado de los ecosistemas en un área tan amplia e importante como la aquí tratada. Los biomas tratados son exclusivamente biomas forestales ya que aquí confluyen la mayor biodiversidad y las mayores amenazas.

Este Proyecto se realiza integrado en las líneas de investigación del Grupo Kraken de la Universidad de Extremadura formando parte de una iniciativa para generar estudios similares sobre los bosques de Iberoamérica.

Objetivos y ámbito del trabajo

Objetivos generales y específicos

El objetivo general de este trabajo es analizar los potenciales efectos del cambio climático sobre la distribución de los bosques de Colombia.

Se alcanzará este objetivo general analizando la distribución espacial de los bosques en la actualidad y proyectando sus dependencias climáticas (nicho climático) a potenciales situaciones en el futuro.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- construir modelos de distribución potencial de los bosques actuales:
  - aplicables al clima reciente.
  - proyectados a situaciones climáticas futuras.
- comparar las distribuciones potenciales actuales con las distribuciones reales.
- comparar las distribuciones potenciales futuras con las distribuciones potenciales actuales.

De la totalidad de biomas forestales analizados se incluye en este trabajo sólo una parte, los más representativos y abundantes, por motivos de espacio. La totalidad del análisis puede encontrarse en el CD que se adjunta y en el Proyecto Fin de Carrera del mismo título que el presente trabajo..

Ámbito del trabajo

El estudio se ha realizado sobre la superficie de la República de Colombia, país ubicado en la zona noroccidental de América del Sur con una superficie de 1.142.750 km^2.

El organismo oficial productor de cartografía es el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC[1]), que adoptó en el año 2005 el sistema geodésico de referencia denominado Magna-Sirgas (Marco Geocéntrico Nacional de Referencia – Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas[2]) sustituyendo al anterior Datum Bogotá.

La definición de Sirgas es idéntica a la del ITRS (International Terrestrial Reference System). La conversión de coordenadas geocéntricas a coordenadas geográficas se adelanta utilizando los parámetros del elipsoide GRS80, equivalente en la práctica al WGS84.

---

[1] http://www.igac.gov.co/

[2] http://www.sirgas.org/

Dentro de estas directrices, la cartografía oficial utiliza la proyección Gauss-Krüger (Transversa Mercator) con 5 orígenes en función de su longitud geográfica, definiendo husos de 3º de anchura, 1,5º a cada lado del meridiano central (Sánchez Rodríguez 2004).

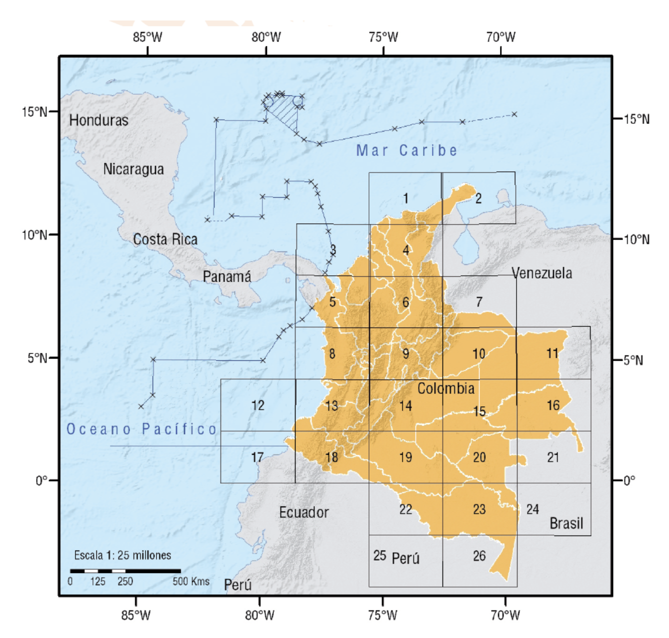


Figura 17. Distribución de las hojas cartográficas correspondientes a la zona continental del Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia.

Según el informe mencionado, la precisión planimétrica es de 1 mm en la escala de publicación lo cual corresponde a un máximo de 500 m sobre el terreno, suficiente para la resolución espacial de este trabajo.

Datos

Datos de vegetación

Este este trabajo hemos utilizado como mapa básico de vegetación el Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales et al. 2007) que llamaremos a partir de ahora Mapa de Ecosistemas.

Este mapa a escala 1:500.000 está formado por 36 hojas cartográficas que cubren el territorio nacional de las cuales 26 hojas correspondientes al territorio continental (Figura 17) ya que no hemos trabajado con ecosistemas marinos.

Clasificación general de los biomas

En Walter (1994a) se definen los biomas como "ambientes grandes y uniformes de la geobiosfera" que corresponden a un área homogénea en términos biofísicos, ubicada dentro de una misma formación biogeográfica. Por lo tanto, un bioma puede considerarse como un conjunto de ecosistemas terrestres afines por sus rasgos estructurales y funcionales, los cuales se diferencian por sus características vegetales (Hernández Camacho y Sánchez Páez 1992). Los diferentes biomas pueden ocupar grandes extensiones y aparecer en distintos continentes donde existen condiciones semejantes de clima y suelos.

De acuerdo con ciertas características de clima, suelo y vegetación, los grandes tipos de biomas se definen como:

Zonobiomas

Los zonobiomas están delimitados por caracteres climáticos específicos que configuran los suelos y una vegetación propia. En (Walter 1994a) se definen nueve zonobiomas básicos cuya característica determinante es el clima: ecuatorial, tropical, subtropical árido, mediterráneo, templado cálido, templado, templado árido, boreal y ártico.

Orobiomas

Los orobiomas están determinados por la presencia de montañas que cambian el régimen hídrico y forman cinturones o fajas de vegetación de acuerdo con su incremento en altitud y la respectiva disminución de la temperatura. Según el rango altitudinal se pueden distinguir tres grandes zonas genéricas dentro de los orobiomas: zona de baja montaña, zona de media montaña y zona de alta montaña.

- Orobiomas bajos, correspondientes a áreas de montaña entre los 500 y 1800 m de altura, donde se presentan temperaturas medias anuales entre 18 y 24 ºC. El rango altitudinal puede variar según la localización geográfica de la montaña. Por ejemplo, en algunas zonas de la cordillera Central de los Andes se ha identificado que la baja montaña se encuentra entre los 700 y 2300 m (Hammen y Preciado 1983), mientras que donde hacen contacto con valles más bajos y mares, los limites pueden bajar.
- Orobiomas medios, localizados aproximadamente entre los 1800 y 2800 m de altura, donde se presentan temperaturas medias anuales entre 12 y 18° C. Al igual que en el orobioma bajo, la altitud del orobioma medio en Colombia puede variar de acuerdo con la posición geográfica. En (Hammen y Preciado 1983) se menciona para la cordillera Central, transecto Los Nevados, un rango altitudinal de 2300 a 3500 m.
- Orobiomas altos, que aparecen por encima del límite superior del piso anterior, a más de 2800 m y hasta el nivel de las nieves perpetuas, unos 4500 m. Como en los casos anteriores, en (Hammen y Preciado 1983) se mencionan un rango diferente para la cordillera Central, transecto Los Nevados, de entre 3500 a 5200 m.

Pedobiomas

Los pedobiomas están condicionados expresamente por el tipo de suelo, generando condiciones azonales de la vegetación que están más influenciados por las condiciones edáficas e hidrológicas que por las climáticas. Según el tipo de factor condicionante, se pueden distinguir diferentes clases:

- Litobiomas: lugares con suelo incipiente sobre roca dura.
- Halobiomas: zonas con suelos anegados con influencia salina.
- Helobiomas: lugares con mal drenaje, encharcamiento permanente o con prolongado periodo de inundación.
- Peinobioma: formado bajo diversas condiciones climáticas y elevaciones en las que pueden presentarse afloramientos rocosos donde ocurren procesos de meteorización de las rocas y una lenta formación de suelos que los recubre.

Los grandes biomas continentales en Colombia

Los tres grandes biomas para Colombia según el Mapa de Ecosistemas (**Figura 18**), son:

- Gran bioma del desierto tropical.
- Gran bioma del bosque seco tropical.
- Gran bioma del bosque húmedo tropical.

Cada uno posee diferentes tipos de biomas ya sean zonobiomas, orobiomas o pedobiomas. Algunos de ellos se definen por sus climas característicos por lo que, para comprender mejor las descripciones, en las Tabla 2 y Tabla **3** se señalan los criterios que se han usado en el Mapa de Ecosistemas.

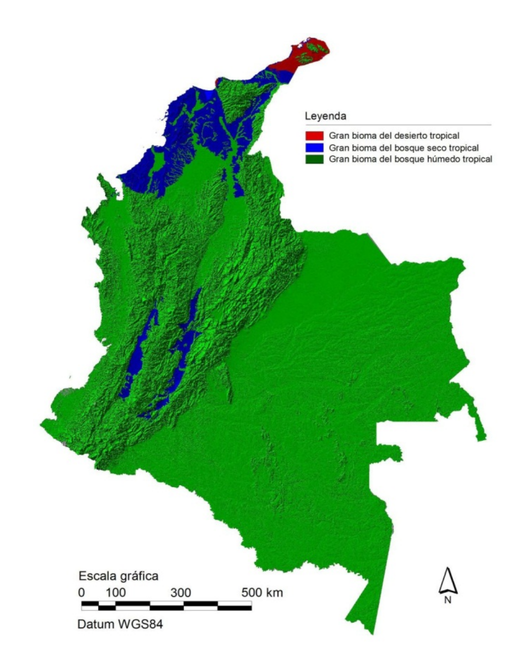


Figura 18. Mapa de distribución de los tres grandes biomas de Colombia.

Denominación	Altitud	Temp. media anual	Superficie (km^2)	% superficie
Cálido	0-800 m	más de 24 ºC	905240	79,4
Templado	801-1800 m	18-24 ºC	114505	10,0
Frío	1801-2800 m	12-18 ºC	77650	6,8
Muy frío	2801-3700 m	6-12 ºC	37235	3,3
Extremadamente frío	3701-4500 m	1,5-6 ºC	5486	0,5
Nival	más de 4500 m	menos de 1,5 ºC	340	<0,1

Tabla 2. Definición de los tipos de clima térmicos.

Denominación	Precipitación total anual (l/m^2)	Superficie (km^2)	% superficie
Árido	0-500	9183	0,8
Seco	501-1000	18352	1,7
Muy seco	1001-2000	221010	19,4
Húmedo	2001-3000	456516	40,0
Muy húmedo	3001-7000	415733	36,5
Pluvial	más de 7000	18662	1,6

Tabla 3. Definición de los tipos de clima pluviales.

En la Tabla 4 se relacionan los grandes biomas y sus biomas internos tal como están definidos en el Mapa de Ecosistemas y que han servido de base para el trabajo. Su distribución espacial se muestra en la Figura 19.

Grandes biomas y biomas continentales

Gran bioma	IDBioma	Bioma
1. Desierto tropical	1	Zonobioma del desierto tropical de La Guajira y Santa Marta
	2	Helobioma de La Guajira
2. Bosque seco tropical del Caribe	3	Zonobioma seco tropical del Caribe
	4	Halobioma del Caribe
	5	Zonobioma alterno hígrico y/o subxerofítico tropical del Alto Magdalena
	6	Zonobioma alterno hígrico y/o subxerofítico tropical del Valle del Cauca
	7	Helobioma del Valle del Cauca
3. Bosque húmedo tropical	8	Zonobioma húmedo tropical de la Amazonia –Orinoquia
	9	Helobioma Amazonia – Orinoquia
	10	Peinobioma de la Amazonia – Orinoquia
	11	Litobioma de la Amazonia –Orinoquia
	12	Zonobioma húmedo tropical del Pacífico-Atrato
	13	Helobioma Pacífico-Atrato
	14	Halobioma del Pacífico
	15	Zonobioma húmedo tropical del Magdalena-Caribe
	16	Helobioma Magdalena-Caribe
	17	Zonobioma húmedo tropical del Catatumbo
	18	Helobioma del río Zulia
	19	Orobioma bajo de los Andes
	20	Orobioma medio de los Andes
	21	Orobioma alto de los Andes
	22	Orobioma azonal de Cúcuta
	23	Orobioma azonal del río Dagua
	24	Orobioma azonal del río Sogamoso
	25	Orobioma azonal del Valle del Patía
	26	Helobiomas andinos
	27	Orobioma de San Lucas
	28	Orobioma de La Macarena
	29	Orobioma del Baudó-Darién
	30	Orobioma bajo de la Sierra Nevada de Santa Marta y La Macuira
	31	Orobioma medio de la Sierra Nevada de Santa Marta
	32	Orobioma alto de la Sierra Nevada de Santa Marta

Tabla 4. Grandes biomas y biomas continentales de Colombia según la Memoria del Mapa de Ecosistemas (p. 147); los colores corresponden a los del mapa de la Figura 19.

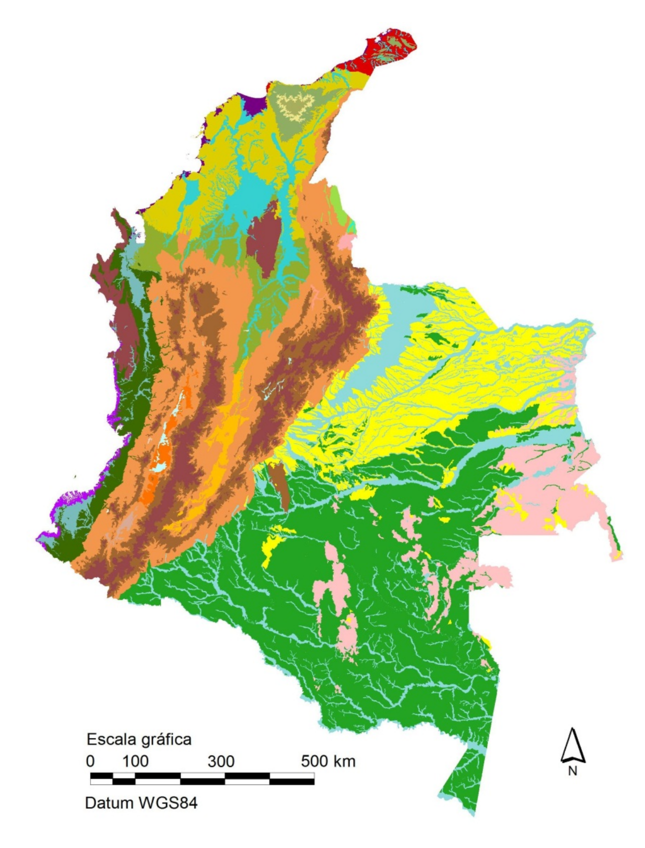


Figura 19. Biomas de Colombia; la leyenda está en la Tabla 4.

Gran bioma del desierto tropical

Este gran bioma cubre una zona limitada, de 7586 km^2, apenas el 1% del territorio nacional, y se caracteriza principalmente por un clima cálido árido con una precipitación media anual inferior a los 500 l/m^2. Incluye algunas áreas marginales en clima cálido muy seco y cálido seco donde la precipitación anual puede ser algo superior. Se localiza por debajo de los 800 m y la cobertura vegetal es muy variable. Este gran bioma está dominado por *Stenocereus griseus* (Melo 2007) con presencia de *Castela*, *Cer-*

cidium, *Melocactus* y *Opuntia*, y es sinónimo de términos como cardonal guajiro (Halffter 1992), desierto guajiro, o matorral claro extremadamente xeromórfico (subdesierto) de la clasificación de UNESCO (1973).

Según la Memora del Mapa de Ecosistemas el 59% del área se encuentra cubierta por formaciones herbáceas, un 23% por formaciones arbustivas y un 16% se presenta como zonas desnudas. El restante 3% se distribuye en otros tipos de cobertura del suelo donde están los muy escasos bosques naturales.

Dentro de este gran bioma se encuentran dos biomas: el zonobioma del desierto tropical de La Guajira y Santa Marta, que representa el 88% del gran bioma y el helobioma de La Guajira, que representa el 12% restante y que aparece siempre en valles de ríos semipermanentes.

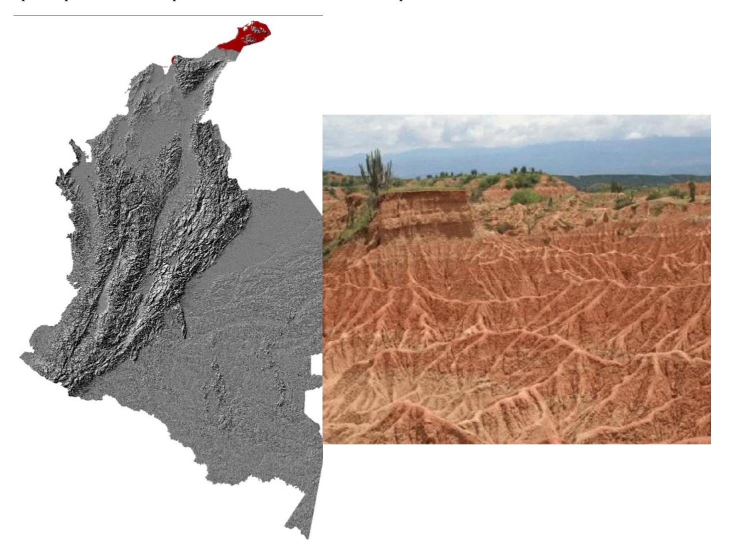


Figura 20. Extensión del gran bioma del desierto tropical.

Figura 21. Paisaje del gran bioma del desierto tropical (imagen de colombianature.webnode.com).

Gran bioma del bosque seco tropical

Este segundo gran bioma abarca una extensión total de 76581 km^2 y corresponde a zonas en las que predominan los climas cálido seco (78%) y

cálido muy seco (9%). La precipitación media anual está entre los 500 y 1000 l/m^2, aunque en algunos sectores se alcanza precipitaciones mayores. La mayor parte de este gran bioma se encuentra localizada entre los 0 y 800 m y equivale a los bosques espinosos y en parte al bosque deciduo por sequía de baja altitud de la clasificación de la UNESCO (1973), o al bioma ecuatorial con lluvias de verano (Walter 1994b).

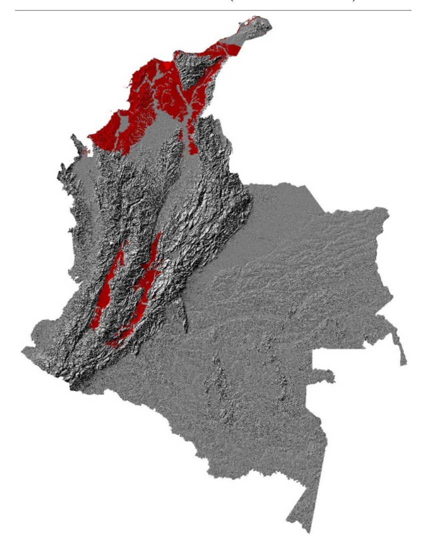


Figura 22. Extensión del gran bioma del bosque seco tropical.

Dentro de este gran bioma se diferencian varios biomas pero generalmente muy modificados por lo que solamente el halobioma del Caribe (5%, 3955 km^2) posee bosques (manglares).



Figura 23. Paisajes del gran bioma del bosque seco tropical (imagen de colombianature.webnode.com)

Gran bioma del bosque húmedo tropical

Este gran bioma abarca una extensión de 1.056.300 km^2 y se caracteriza por zonas en las que se presentan dos tipos de clima dominantes: cálido húmedo (37%) y cálido muy húmedo (37%). Como rasgo común, la precipitación anual es superior a los 2.000 l/m^2, con un rango de altitudes entre 0 y 1800 m. La vegetación de este gran bioma es la selva lluviosa tropical o, equivalentemente, el bosque tropical ombrófilo montano y submontano de la clasificación de la UNESCO (1973).

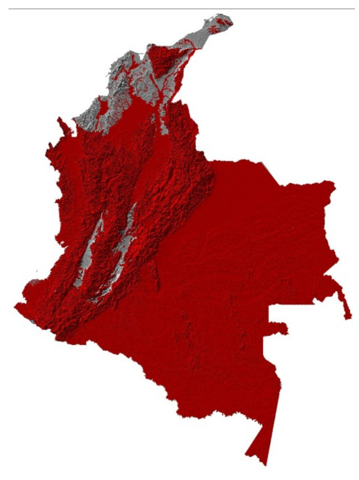


Figura 24. Extensión del gran bioma del bosque húmedo tropical

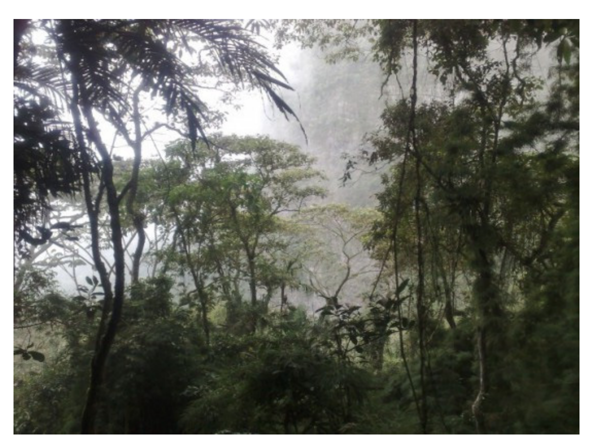


Figura 25. Paisaje del gran bioma de bosque húmedo tropical (bosque de niebla, imagen de colombianature.webnode.com)

Datos climáticos

Datos básicos: clima reciente

La información climática básica fue proporcionada por WorldClim–Global Climate Data[3]. Los datos de clima reciente se refieren las medias del periodo 1951-2007, de donde se disponer de temperaturas medias de las máximas y de las mínimas y de precipitaciones.

Los mapas disponibles en Worldclim se elaboraron a partir de varias decenas de miles de estaciones (Hijmans et al. 2005) y fueron recortados en este trabajo para ceñirlos a la zona de estudio. Para el proyecto se han considerado tres variables climáticas: temperatura media de las máximas (TX), media de las mínimas (TM) y precipitación total (PR), toda ellas a nivel mensual y con una resolución de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km en el Ecuador).

Datos básicos: clima futuro

Dadas las incertidumbres respecto a lo que pasará en las siguientes décadas, se planteó usar diversas combinaciones de modelos y escenarios con el objetivo de cubrir un abanico de posibilidades amplio. Como en el caso del clima reciente, las proyecciones al futuro se descargaron del portal WorldClim–Global Climate Data y corresponden a escenarios IPCC3 con una resolución espacial de 30 segundos de arco. Describimos a continuación las variantes que se han utilizado en este trabajo.

Modelos globales y sus proyecciones

Diversas instituciones han utilizado modelos informáticos para generar escenarios plausibles (proyecciones) para tiempos futuros. Dado que estas proyecciones están sujetas a incertidumbre (los modelos son simplificaciones de la realidad y el clima es un sistema muy complejo) es previsible que estimaciones hechas con modelos distintos den resultados diferentes. La cuestión es verificar si esas predicciones son muy diferentes o muestran una coherencia que de solidez a las previsiones. En este proyecto se han generado modelos de distribución potencial para los modelos globales siguientes:

- CCCMA, Canadian Center for Climate Modelling and Analysis[4].
- CSIRO, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation[5].

---

[3] http://www.worldclim.com/

[4] http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/

[5] http://www.csiro.au/

- HadCM3, Hadley Centre Coupled Model[6].

Escenarios de emisiones

Definido un modelo, es necesario determinar las condiciones de los factores influyentes en la evolución del clima, es decir, los escenarios. La definición de escenario que da el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) es que son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro y pueden ser utilizados para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación.

Para cada modelo se han considerado en este trabajo dos escenarios de emisiones, A2 y B2, correspondientes a los igualmente denominados del IPCC.

Horizontes temporales

Los datos de proyecciones suministrados por WorldClim abarcan el periodo 2020-2080. Para no multiplicar excesivamente las combinaciones modelo-escenario-horizonte se ha optado por realizar los cálculos para el año 2050, ni excesivamente cercano ni tal alejado del presente que las incertidumbres seas excesivas.

Metodología

Mapas climáticos

Tanto los mapas de variables climáticas actuales como futuras se integran directamente en el SIG ya que se descargan en un formato estándar (ASCII raster). La única operación que es necesario hacer es el recorte de la zona de estudio ya que el área original abarca la totalidad de la Tierra. Esto se realizó definiendo un marco rectangular que incluye la zona continental de la República de Colombia y aplicándolo a la totalidad de los mapas disponibles: 36 para el presente (12 meses x 3 variables) y 36 para cada combinación de modelo y escenario. Los mapas recortados se organizan en una estructura de carpetas que facilite el tratamiento automatizado.

Modelos de distribución potencial (MDP)

El área geográfica donde una especie animal o vegetal aparece es normalmente una fracción del área que potencialmente podría ocupar. La reducción del área de distribución actual respecto al área de distribución potencial se debe a un conjunto complejo de factores, tanto abióticos como bióticos. Entre los primeros están los factores topográficos, geoló-

[6] http://www.ipcc-data.org/sres/hadcm3_download.html

gicos y climáticos y entre los segundos la competencia interespecífica, la capacidad de dispersión o la influencia humana.

Construcción de un MDP aplicado a la actualidad

El procedimiento genérico que se sigue para construir un MDP de la especie o bioma *i* se organiza en los siguientes pasos:

1. Localizar geográficamente las presencias de *i* y, si es posible, establecer igualmente puntos de ausencia. En el caso de proceder de mapas como en este trabajo, las ausencias se toman sobre biomas diferentes. La presencia/ausencia se constituye como variable dependiente dicotómica.
2. Definir un conjunto de variables descriptivas que se utilizarán como predictores para definir un nicho ambiental para cada especie a partir de los datos de presencias y ausencias disponibles y su localización geográfica. Las variables descriptivas en este caso son las variables climáticas.
3. Extraer para cada punto de presencia o ausencia los valores de las variables independientes que le corresponden en esa localización geográfica. El conjunto de registros presencia/ausencia, coordenadas geográficas, valores de variables descriptivas forma la muestra de entrenamiento.
4. Establecer una relación estadística entre las variables descriptivas y la dependiente (presencia/ausencia). Este proceso consiste esencialmente en generar un algoritmo que relacione cada combinación de variables independientes con la presencia o ausencia de la especie analizada. Esta relación se denomina modelo estadístico:
5. Valorar la bondad del modelo estadístico, es decir, hasta qué punto dicho modelo ha podido describir correctamente la relación entre los datos de presencia y ausencia que se le han suministrado.
6. Construir el modelo cartográfico o modelo de distribución potencial (MDP) a partir del modelo estadístico. Este procedimiento se realiza etiquetando cada punto del área de estudio con el valor P(*i*) que le corresponda en función de los valores de las variables independientes en ese punto.

El MDP de un bioma es un mapa que representa lo adecuado o inadecuado del territorio para la presencia del bioma en una escala continua que suele ajustarse al rango 0-1 (0 : incompatible, 1 : idóneo).

Métodos estadísticos

Lo que se ha llamado modelo estadístico puede construirse con una amplia variedad de métodos. El más usado hasta hace pocos años fue la regresión logística multivariable (RLM) aunque más recientemente los investigadores han comenzado a explorar otros métodos buscando sobre todo superar las limitaciones inherentes a los métodos paramétricos.

En este trabajo se ha usado MAXENT como método general para generar los modelos. El motivo es que trabajos anteriores y pruebas realizadas por el grupo de investigación en cuyo contexto se realiza este trabajo han mostrado que MAXENT tiene tres propiedades simultáneas que lo han convertido en el método idóneo:

- genera resultados coherentes espacialmente, sin rupturas bruscas o patrones extraños sin sentido biológico.
- en las pruebas comparativas siempre muestra valores de ajuste situados entre los máximos del conjunto de métodos.
- no necesita grandes muestras.

Construcción de los MDP futuros

La posible influencia del cambio climático en la distribución de un bioma se ha evaluado de acuerdo con los siguientes pasos:

- se construye el MDP actual usando como variables descriptivas las variables climáticas medidas en el periodo estándar 1951-2007.
- se estiman los valores de variables climáticas para un periodo futuro de acuerdo con los procedimientos ya explicados en otras secciones.
- se aplica el modelo estadístico generado para 1951-2007 usando los nuevos valores de las variables climáticas.

Maxent permite aplicar el modelo estadístico realizado con los datos actuales a múltiples escenarios alternativos, algo que ha permitido solucionar el problema de las proyecciones futuras.

Modelización con MAXENT

MAXENT

En este trabajo los modelos se han construido con MAXENT, acrónimo de máxima entropía, un algoritmo que ha sido adaptado para la construcción de modelos de distribución potencial con características como las siguientes (S Phillips, Anderson, y Schapire 2006; SJ Phillips et al. 2009):

- La distribución de una especie se representa mediante una función de probabilidad P sobre un conjunto X de lugares en el área estudiada. P asigna un valor positivo a todo lugar x de forma que la suma de P(x) es la unidad.
- Se construye un modelo de P mediante un conjunto de restricciones derivados de datos empíricos de presencia.
- La restricciones se expresan como funciones simples de variables ambientales conocidas, *f*(v).
- El método que usa MAXENT obliga a que la media de cada función de cada variable esté próxima a la media real de la variable en las zonas de presencia; por ejemplo, la función correspondiente a la precipitación de enero debe generar una predicción de la misma cercana a la precipitación real observada.
- De las posibles combinaciones de funciones, se utiliza la que minimiza la función de entropía medida con el índice de Shannon lo que, según los autores, permite realizar una selección óptima de variables y funciones en función de su significación y eliminar las que no aportan restricciones significativas al modelo.

Los autores destacan que los valores P(x) así obtenidos no tienen el significado estricto de probabilidad sino que deben interpretarse como valores de idoneidad relativa. Estos valores son normalmente transformados mediante una función logística que se ajusta a una escala más comprensible en el rango entre 0 (incompatible) y 1 (idóneo).

Resultados disponibles

Los resultados que genera MAXENT no son solamente los mapas resultantes de aplicar el modelo sino que a este le acompaña una serie de estadísticos y gráficos complementarios que ayudan a su valoración. Tras la construcción de un modelo MAXENT genera una página HTML con una serie de apartados de los cuales describimso los de mayor aplicación a nuestro caso.

Gráfico de la curva ROC

Como ya se ha comentado, la curva ROC muestra las relaciones entre falsos positivos y falsos negativos para los diferentes umbrales y el área bajo la curva (AUC) es un estadístico de ajuste. La Figura 26 muestra un ejemplo de este tipo de gráfica.

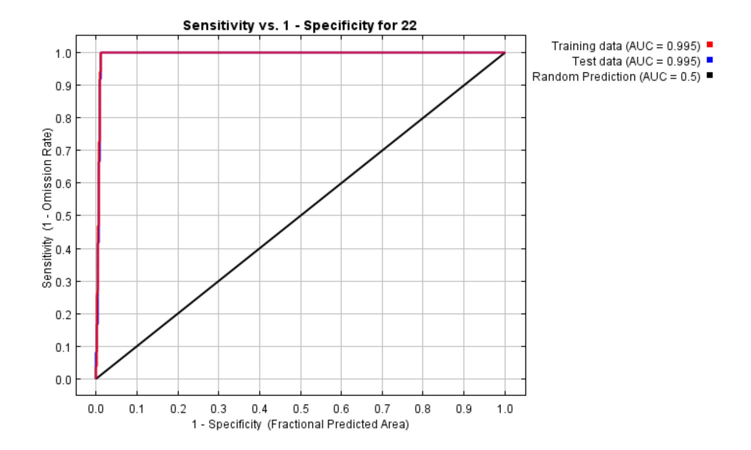


Figura 26 Gráfico de curva ROC donde se representan la sensibilidad y especificidad en función del punto de corte.

Las cifras dan los valores de AUC para la muestra de entrenamiento y la muestra de control donde, habitualmente, el valor de AUC para la muestra de control es inferior a la de entrenamiento ya que el modelo se ha calculado para un máximo ajuste a esta última. Cuando ambos valores son muy similares se puede interpretar que ambas muestras están extraídas verosímilmente de la misma población y son representativas de la misma. El modelo en estos casos suele ser robusto en el sentido de ser poco sensible a cambios en la composición muestral, algo habitual cuando las muestras son de tamaño suficiente.

Cuando existe una muestra de control, MAXENT calcula la significación estadística de la predicción usando una prueba binomial de omisión que aparece en una tabla a continuación de esta figura.

Importancia de las variables

MAXENT muestra una tabla donde las variables están ordenadas en función de un valor expresado en porcentaje. Un ejemplo puede ser el siguiente (*Chamaerops humilis* en España, procedente de otro proyecto):

- precipitación de junio (pr6, 4.6%)
- temperatura media de las máximas de octubre (tx10, 39%)
- temperatura media de las mínimas de febrero (tm2, 10.7%)
- precipitación de julio (pr7, 44.1%)

- precipitación de junio (pr12, 0.3%)

Estas contribuciones no deben entenderse necesariamente como la causa de la distribución de la planta o del bioma sino como las variables que contribuyen en mayor medida a llegar a una buena separación entre las zonas idóneas e inadecuadas. Es posible que tengan un sentido biológico claro o simplemente que actúen como indicadores. El análisis de ese posible sentido biológico debe hacerse examinando las curvas de respuesta de la predicción con cada variable.

Curvas de respuesta

Este tipo de gráfico muestra cómo afecta cada variable ambiental a la predicción de MAXENT de forma que el eje de ordenadas muestra la probabilidad predicha de condiciones idóneas ante los valores cada variable que aparecen en el eje de abscisas. Abajo se muestra un ejemplo concreto tomado de otro proyecto.

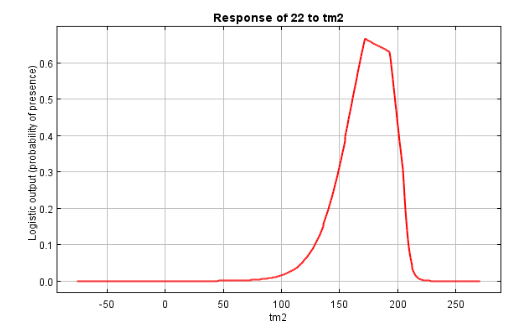


Figura 27 Curva de respuesta ante las temperaturas mínimas de febrero (caso de *Chamaerops humilis* en España).

En el caso de la **Figura 27**, las relaciones con la temperatura media de las mínimas de febrero muestran un óptimo entre los 17 y 19 ºC aproximadamente, despareciendo por debajo de los 10 ºC y por encima de los 22 ºC.

Control del error

La curva ROC y el estadístico AUC

La bondad de los modelos estadísticos se ha estimado mediante el estadístico AUC o área bajo la curva ROC (*receiver operating characteristic*) (Fielding y Bell 1997).

Las curvas ROC son la representación gráfica de la capacidad discriminativa de un determinado modelo a partir de todos sus puntos de corte posibles. En el eje de abscisas se representan los valores de (1-especificidad) y en el de ordenadas los valores de la sensibilidad. La curva ROC explica que un aumento de la sensibilidad va en detrimento de la especificidad y viceversa, por lo que la selección del umbral, si es necesaria, exige un compromiso entre estos dos valores.

El principal índice descriptivo de la curva ROC es el área por debajo de la misma o AUC (area under the ROC curve) cuyos valores están en el rango 0,5-1. Un valor de 0,5 significa que el modelo no tiene valor discriminante y es equivalente a una clasificación aleatoria. En el otro extremo, si el AUC es la unidad, el modelo ha separado presencias de ausencia con un ajuste perfecto, sin errores.

El estadístico AUC es equivalente al estadístico U de Mann-Whittney y, en síntesis corresponde a la probabilidad de que, tomado al azar un par de casos, uno positivo y otro negativo, el modelo adjudique al positivo un valor mayor.

Cabe señalar que el estadístico AUC ha sido criticado por algunas deficiencias en su aplicación al análisis de los modelos predictivos (Lobo, Jiménez-Valverde, y Real 2008). Esas deficiencias son reales y sólo pueden paliarse mediante una interpretación adecuada que tenga en cuenta cuales son las limitaciones de los modelos y del estadístico AUC en concreto. Por el momento no se ha propuesto alternativa al AUC.

Convencionalmente se suele aplicar una escala de interpretación como la siguiente:

- AUC > 0.95 La distribución actual se explica muy bien a partir de las variables climáticas, el modelo es excelente.
- 0.85 < AUC < 0.95 La distribución actual se explica bien a partir de las variables climáticas, el modelo es bueno.
- 0.75 < AUC < 0.85 La distribución actual se explica moderadamente bien a partir de las variables climáticas, el modelo es aceptable.
- AUC < 0.75 La distribución actual se explica sólo parcialmente a partir de las variables climáticas, el modelo es pobre.

Estos límites no deben interpretarse literalmente pero dan una idea aproximada del significado del AUC en este tipo de modelos.

Proceso de cálculo del AUC

En la elaboración de los modelos se han calculado dos valores de AUC. El primero corresponde a la muestra de entrenamiento, la muestra utilizada para construir el modelo. El segundo corresponde a la muestra de control, una muestra independiente a la que se aplica el modelo estadístico para ver hasta qué punto es capaz de clasificarla. Como cabe esperar, los AUC de las muestras de entrenamiento suelen ser mejores que los de control ya que el modelo se construye específicamente para las primeras. Si ambos AUC tienen valores similares es un signo de que el modelo es robusto y o una cierta garantía de corrección y estabilidad.

Resultados

Modelos de biomas

Se muestran a continuación los resultados de los modelos realizados para los biomas de bosques excluyendo, por tanto, algunos como los relativos al desierto tropical, no forestal. Por problemas de espacio sólo mostramos los biomas con valores buenos de ajuste (AUC >0,65), así como las gráficas de las variables más importantes. Se incluyen tanto la contribución general al modelo (*percent contribution*) como la dependencia del modelo frente a la variable (*permutation importance*).

Zonobioma del bosque seco tropical del Caribe (cód. 3)

Este bosque seco tropical se define como una formación vegetal que presenta una cobertura boscosa continua y que se distribuye entre los 0-1000 m de altitud. Presenta temperaturas superiores a los 24 ºC (piso térmico cálido) y precipitaciones entre los 700 y 2000 l/(m^2·año) con uno o dos periodos marcados de sequía al año (Instituto Alexander von Humboldt 1998).

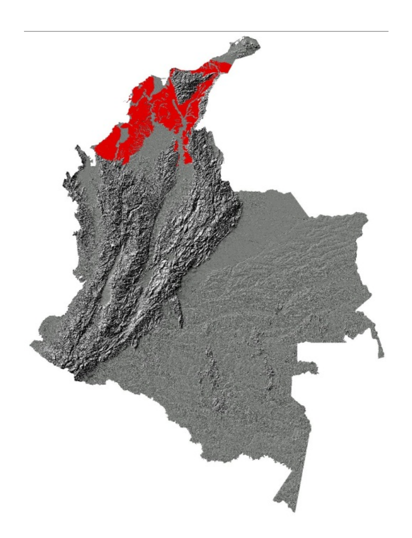


Figura 28. Extensión actual del bioma 3.

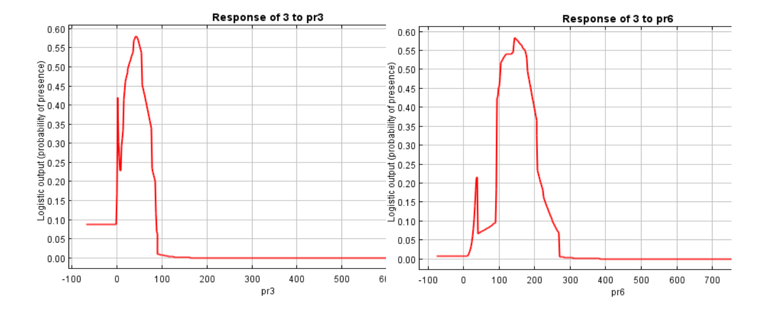
De los gráficos siguientes se deduce un buen ajuste del modelo (AUC=0,875) que está caracterizado por las precipitaciones de marzo (inferiores a 10 l/m^2) y junio (entre 10 y 25 l/m^2) y por las temperaturas máximas de julio (superiores a los 30 ºC). Estos datos complementan los generales citados en el párrafo anterior, donde solo se hace referencia a variables anuales.



Figura 29. Paisaje del zonobioma de bosque seco tropical del Caribe (imagen de www.imeditores.com)

Variable	Percent contribution	Permutation importance
pr3	47,0	9,1
pr6	22,7	26,4
tx7	12,6	11,6

Tabla 5. Importancia de las variables para el bioma 3.



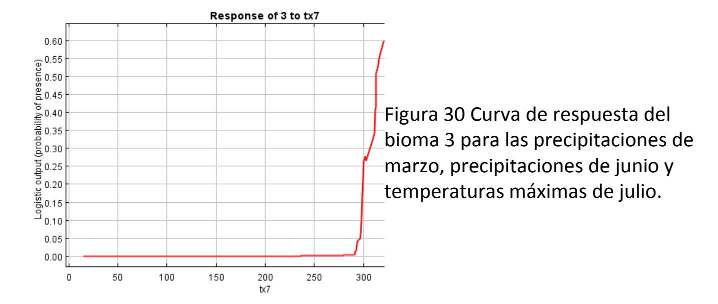


Figura 30 Curva de respuesta del bioma 3 para las precipitaciones de marzo, precipitaciones de junio y temperaturas máximas de julio.

Halobioma del Caribe (cód. 4).

Este bioma aparece en lugares con mal drenaje, encharcamiento permanente o con prolongado periodo de inundación con pastos como principal cobertura seguida por aguas continentales y bosques naturales. De los gráficos siguientes se deduce que el modelo es adecuado (AUC=0,922) y que está caracterizado por unas temperaturas mínimas de julio y septiembre superiores a los 22 ºC.

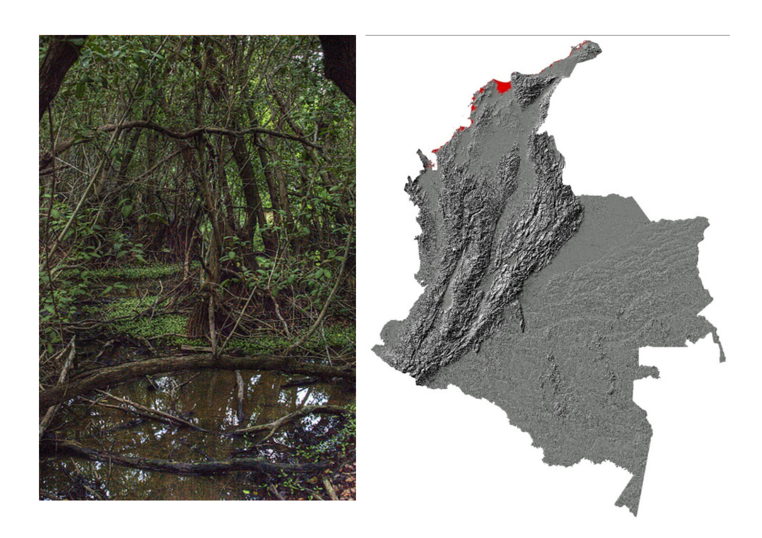
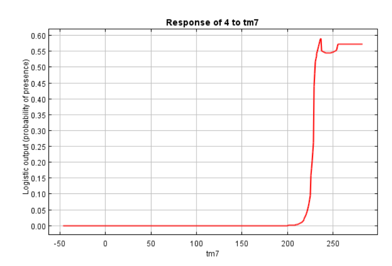


Figura 31. Paisaje del halobioma del Caribe (manglar, foto AMF).

Figura 32. Extensión actual del bioma 4.

Variable	Percent contribution	Permutation importance
tm7	25,7	0,0
tm9	17,2	0,0
pr4	13,5	1,5

Tabla 6. Importancia de las variables para el bioma 4.



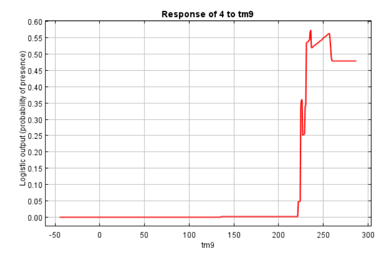


Figura 33. Curva de respuesta del bioma 4 para las variables: temperaturas mínimas de julio, temperaturas mínimas de septiembre, temperaturas mínimas de octubre y precipitaciones de abril.

Helobiomas del Pacífico y Atrato (cód. 13)

Estos biomas se localizan sobre llanuras inundables, pantanos y ciénagas. En las llanuras inundables, el uso más común es la extracción de madera ya que el bosque natural supone más de dos tercios de la superficie. De los gráficos siguientes se deduce que el modelo es adecuado (AUC=0,778) y que está caracterizado por unas precipitaciones en junio entre los 30 y 80 l/m^2) y por unas temperaturas mínimas de agosto entre 17 y 24 ºC y por unas máximas de febrero entre 26 y 33 ºC.

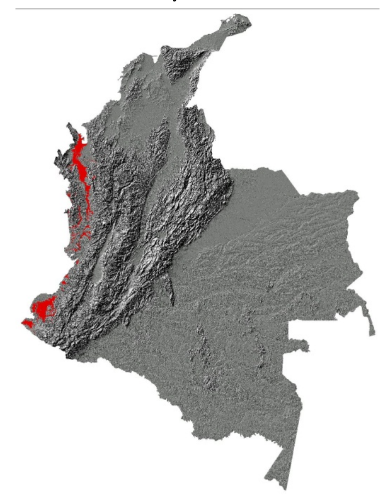
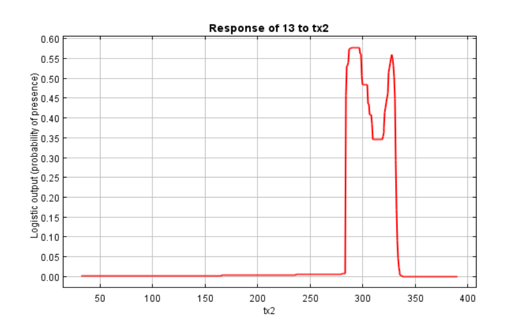


Figura 34. Extensión actual del bioma 13.

Variable	Percent contribution	Permutation importance
pr6	34,1	52,9
tm8	29,3	3,9
tx2	10,6	17,5

Tabla 7. Importancia de las variables para el bioma 13.



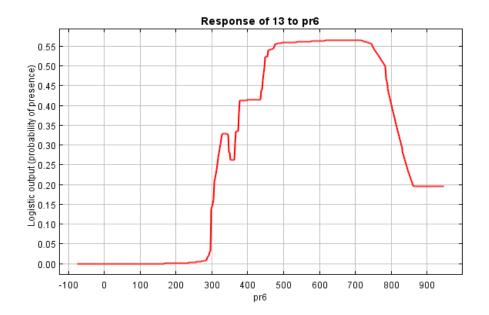


Figura 35 Curva de respuesta del bioma 13 para las precipitaciones de junio y temperaturas máximas de febrero

Halobiomas del Pacífico (cód. 14)

Este bioma se encuentra sobre planicies aluviales costeras y, como todos los de su grupo, se caracteriza por el anegamiento y salinidad. Con climas siempre cálidos y húmedos, la cobertura de bosques naturales (manglares) es de alrededor del 70% dominados por *Laguncularia* y *Rhizophora* (Jiménez 2000). De los gráficos siguientes se deduce que el modelo es adecuado (AUC=0,785) y que está caracterizado por unas precipitaciones en enero entre los 25 y 45 l/m^2), por unas temperaturas mínimas de julio entre 22 y 24 ºC y por unas máximas de octubre entre 26 y 30 ºC.

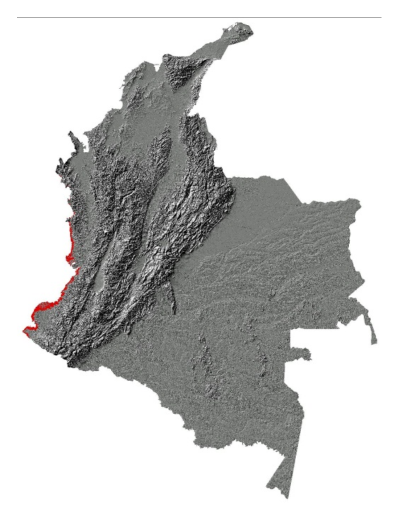


Figura 36. Paisaje del halobioma del Pacífico (manglar, imagen de colom-biianature.webnode.com).



Figura 37. Extensión actual del bioma 14.

Variable	Percent contribution	Permutation importance
pr1	30,5	17,5
tm7	29,0	3,6
tx10	26,4	3,9

Tabla 8. Importancia de las variables para el bioma 14.

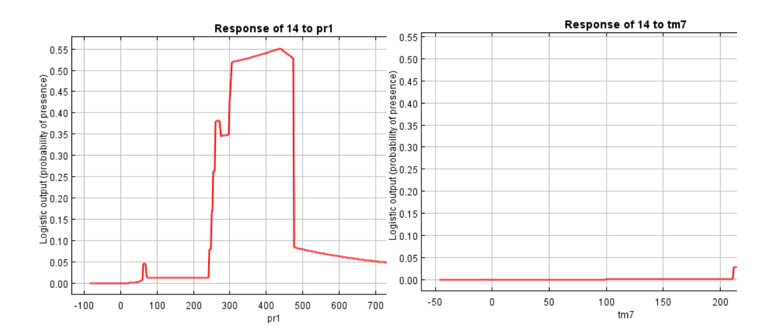


Figura 38 Curva de respuesta del bioma 14 para las precipitaciones de enero y temp. mínimas de julio.

Zonobioma húmedo tropical del Magdalena y Caribe (cód. 15)

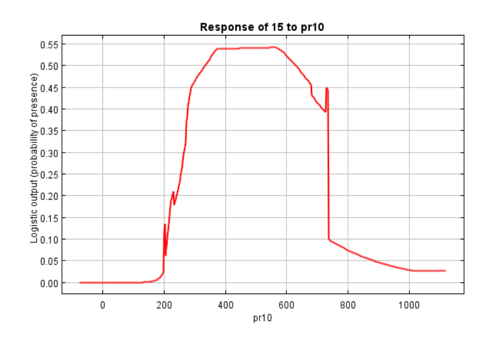
Este bioma, distribuido sobre lomas, piedemontes y planicies aluviales, está cubierto por bosques naturales en un tercio aproximadamente. El modelo está en el límite del umbral fijado de bondad de ajuste ya que su AUC=0,668) y es interesante observar que es único bioma hasta el momento caracterizado únicamente por las precipitaciones: entre los 20 y 75 l/m^2 en octubre, por debajo de los 15 l/m^2 en febrero y por debajo de los 20 l/m^2 en marzo.



Figura 39. Extensión actual del bioma 15.

Variable	Percent contribution	Permutation importance
pr10	31,1	9,7
pr2	23,8	13,5
pr3	10,7	11,5

Tabla 9. Importancia de las variables para el bioma 15.



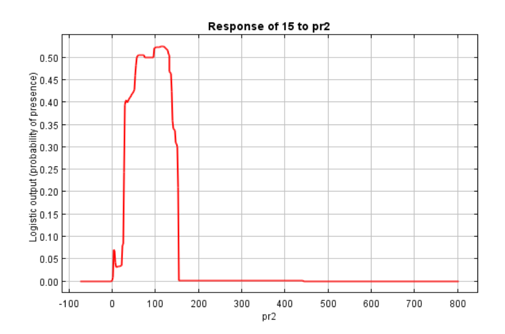


Figura 40 Curva de respuesta del bioma 15 para las precipitaciones de octubre y de febrero.

Helobioma de Magdalena y Caribe (cód. 16)

Este bioma se caracteriza, como los de su grupo por encharcamiento permanente o inundaciones prolongadas. Con clima cálido se encuentra principalmente sobre planicies y valles aluviales con una cobertura de bosques naturales de un 8%. El modelo es adecuado (AUC=0,827) y está caracterizado por una sola variable, la temperatura media de las máximas de julio, que debe estar entre los 30 y 35 ºC.

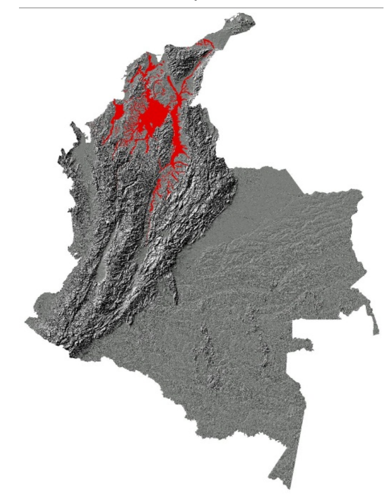


Figura 41. Extensión actual del bioma 16.



Figura 42. Paisaje de helobioma (imagen de aromaverde.org).

Variable	Percent contribution	Permutation importance
tx7	79.1	68

Tabla 10. Importancia de las variables para el bioma 16.

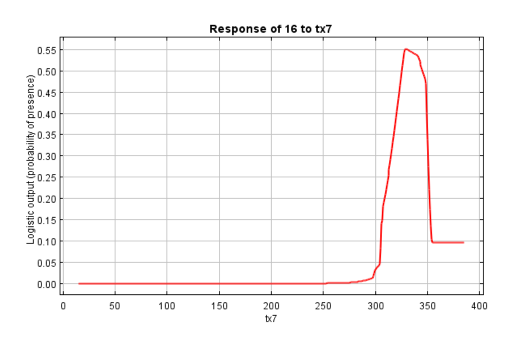


Figura 43. Curva de respuesta del bioma 16 para las temperaturas máximas de julio.

Síntesis de resultados de ajuste y tabla de biomas final

Los análisis de evolución en los escenarios de cambio climático se van a hacer con los bosques cuyos modelos tienen un ajuste satisfactorio, valorado en un valor de AUC superior a 0,65. En la **Tabla 11** se muestran los biomas que serán analizados con mayor profundidad. En resumen, se analizarán de 15 de los 23 biomas forestales originales.

Código	Bioma	Clima
3	Zonobioma del bosque seco tropical del Caribe	Cálido muy seco
4	Halobioma del Caribe (manglar)	Cálido muy seco
13	Helobioma del Pacífico y Atrato	Cálido muy húmedo
14	Halobioma del Pacífico (manglar)	Cálido muy húmedo
15	Zonobioma húmedo tropical del Magdalena y Caribe	Cálido húmedo
16	Helobioma de Magdalena y Caribe	Cálido muy seco
17	Zonobioma húmedo tropical del Catatumbo	Cálido muy húmedo
21	Orobioma alto de los Andes	Muy frio seco
22	Orobioma azonal de Cúcuta	Cálido seco
27	Orobioma de San Lucas	Templado Húmedo

28	Orobioma de la Macarena	Cálido húmedo
29	Orobioma del Baudó y Dairén	Cálido Húmedo
30	Orobioma bajo de la Sierra Nevada de Santa Marta y Macuira	Templado seco
31	Orobioma medio de la Sierra Nevada de Santa Marta	Frío muy húmedo
32	Orobioma alto de la Sierra Nevada de Santa Marta	Muy frío húmedo

Tabla 11. Listado de bosques analizados a partir de los valores de AUC de los modelos previos.

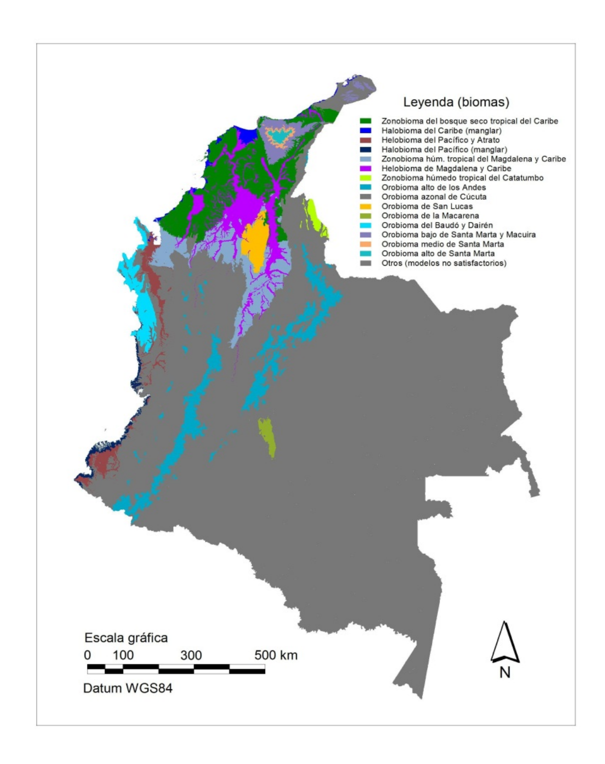


Figura 44. Mapa de biomas cuyos modelos superaron el umbral de ajuste (AUC>0,65).

Evolución general de las áreas potenciales

En este apartado presentamos la evolución general de superficie idónea para cada bioma según las combinaciones de escenarios (A2 y B2) y modelos: CCCMA (CC), CSIRO (CS) y Hadam3H (HA). Estos resultados se derivan de los mapas de distribución potencial o idoneidad realizados con MAXENT. Sobre estos mapas se ha delimitado y medido la superficie de zonas potenciales tomando un valor umbral de 0,5. La misma operación se ha realizado sobre todos los mapas de proyección al futuro y las superficies han sido utilizadas para las representaciones gráficas de este apartado.

La evolución en superficie de las zonas potenciales nos da una idea de la influencia directa del cambio climático a nivel general en función de los cambios respecto al clima actual.

Escenario A2

Los gráficos representan el cambio de la superficie de la zona potencial para cada bioma desde el presente hasta el año 2050 en función de los modelos climáticos considerados para el escenario A2. En la **Figura 45** se muestran los resultados para los biomas 3 (zonobioma seco tropical del Caribe), 4 (halobioma del Caribe, manglar)) y 13 (helobioma del Pacífico y Atrato). Para comentar un caso concreto, en el zonobioma seco tropical del Caribe se observa una fuerte reducción para los tres modelos, más acentuada en el Hadam3H que en los CCCMA y CSIRO. Los datos numéricos en % se muestran en la **Tabla 12**.

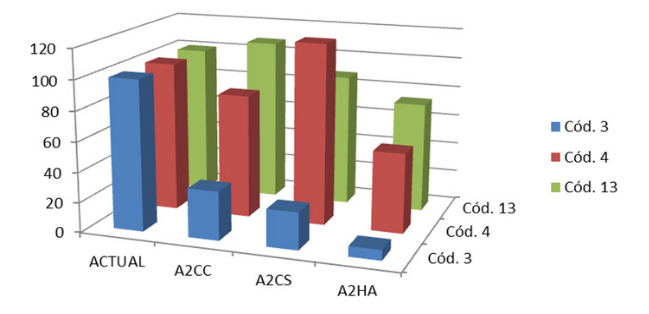


Figura 45. Evolución en superficie (km^2) de los biomas 3, 4 y 13 para el escenario A2 y modelos CCCMA (CC), CSIRO (CS) y Hadam3H (HA).

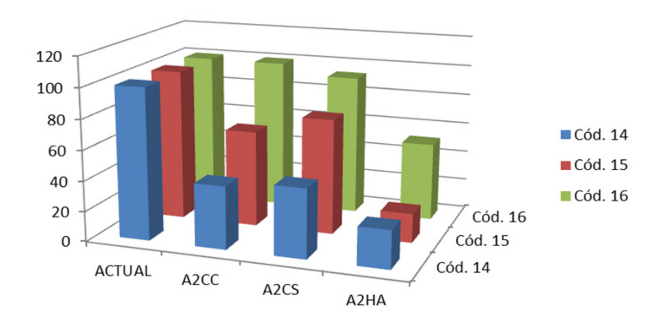


Figura 46. Evolución en superficie (km^2) de los biomas 13, 15 y 16 para el escenario A2 y modelos CCCMA (CC), CSIRO (CS) y Hadam3H (HA).

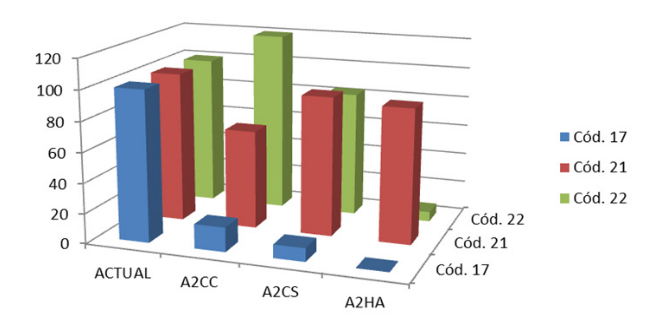


Figura 47. Evolución en superficie (km^2) de los biomas 17, 21 y 22 para el escenario A2 y modelos CCCMA (CC), CSIRO (CS) y Hadam3H (HA)

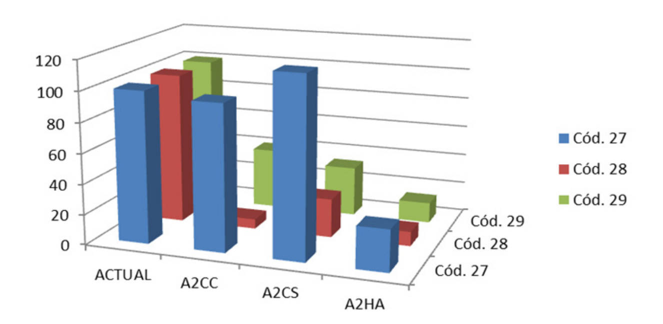


Figura 48. Evolución en superficie (km^2) de los biomas 27, 28 y 29 para el escenario A2 y modelos CCCMA (CC), CSIRO (CS) y Hadam3H (HA).

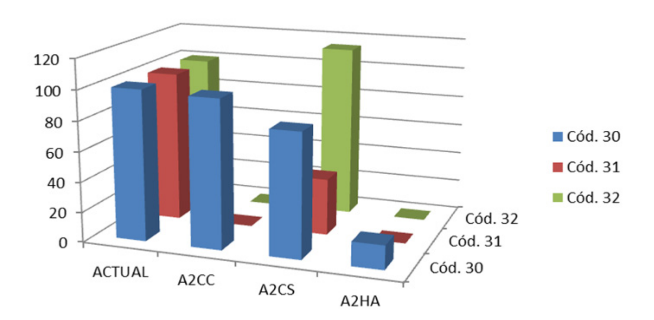


Figura 49. Evolución en superficie (km^2) de los biomas 30, 31 y 32 para el escenario A2 y modelos CCCMA (CC), CSIRO (CS) y Hadam3H (HA).

Escenario B2

En esta sección se muestran los gráficos equivalentes a los del apartado anterior referidos al escenario B2. El significado es el mismo y las unidades de superficie son también km^2.

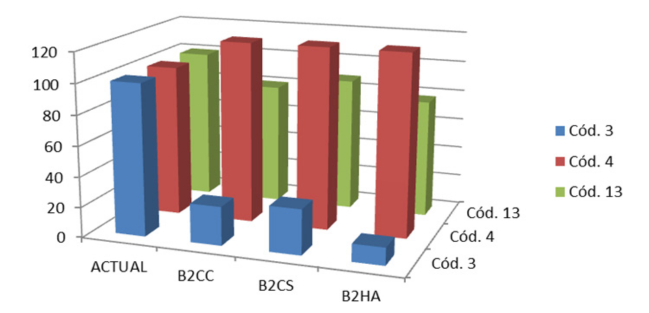


Figura 50. Evolución en superficie (km^2) de los biomas 3, 4 y 13 para el escenario B2 y modelos CCCMA (CC), CSIRO (CS) y Hadam3H (HA).

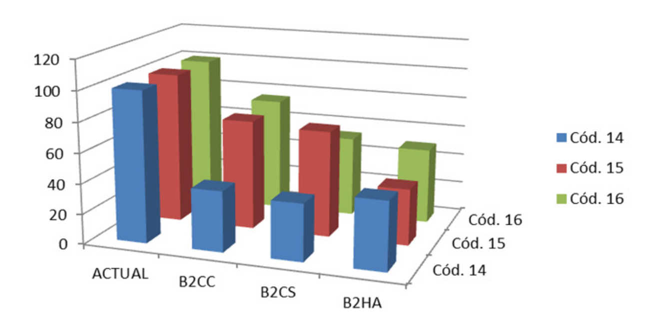


Figura 51. Evolución en superficie (km^2) de los biomas 14, 15 y 16 para el escenario B2 y modelos CCCMA (CC), CSIRO (CS) y Hadam3H (HA).

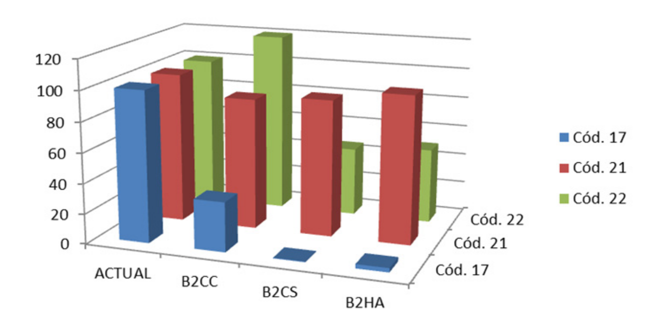


Figura 52. Evolución en superficie (km^2) de los biomas 17, 21 y 22 para el escenario B2 y modelos CCCMA (CC), CSIRO (CS) y Hadam3H (HA).

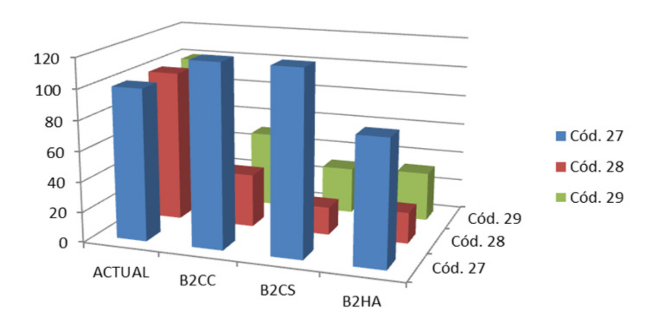


Figura 53. Evolución en superficie (km^2) de los biomas 27, 28 y 29 para el escenario B2 y modelos CCCMA (CC), CSIRO (CS) y Hadam3H (HA).

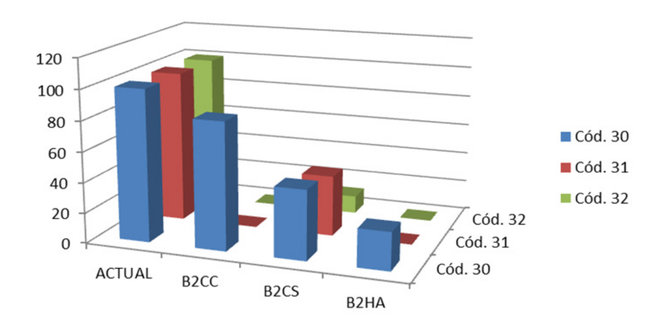


Figura 54. Evolución en superficie (km^2) de los biomas 30, 31 y 32 para el escenario B2 y modelos CCCMA (CC), CSIRO (CS) y Hadam3H (HA).

Resultados del cambio de superficies

A partir de los datos representados en las figuras anteriores se han comparado los mapas correspondientes a cada combinación de escenario/modelo con el mapa de idoneidad actual para hacer una síntesis de la afección potencial de cada bioma y grupo de biomas.

La **Tabla 12** muestra los cambios previstos en porcentaje respecto al área potencial actual, por tanto los valores superiores a 100 suponen un incremento del área y los inferiores una reducción. La gama de colores se ha elegido para mostrar con más claridad los incrementos (en tonos de verde) y las reducciones de superficie (en tonos de amarillo a rojo).

Cód. bioma	A2/CC	A2/CS	A2/HA	B2/CC	B2/CS	B2/HA
3	32	25	7	26	30	11
4	82	123	53	120	132	132
13	108	88	73	80	88	78
14	41	45	25	40	38	45
15	63	76	19	73	70	37
16	100	93	52	75	53	50
17	16	9	0	33	0	3
21	65	92	89	87	91	98
22	120	83	7	142	46	50
27	96	118	28	148	125	82
28	6	26	10	35	18	20
29	40	33	13	50	31	32
30	98	82	16	84	46	25
31	0	38	0	0	40	0
32	0	114	0	0	12	0

Tabla 12. Porcentaje de cambio de superficie de cada bioma prevista para las diferentes combinaciones de escenario y modelo climático.

De la tabla anterior extraemos algunos datos generales:

- De los 90 valores, 78 muestran reducción de área y 12 muestran crecimiento.
- El valor medio general de cambio es del 53%, una reducción que supone prácticamente la mitad de la superficie potencial actual.

- Ambos escenarios muestran reducciones medias similares: 51% para el A2 y 55% para el B2.
- Los modelos muestran porcentajes de cambio medio diferentes: 62% para el CCMA y CSIRO y 35% para Hadam3H.
- La combinación que genera mayores reducciones es la A2/Hadam3H (queda un 26% de la superficie potencial actual).
- Los biomas más perjudicados (con reducción de más de dos tercios de su área potencial actual) en el conjunto de escenarios/modelos son el 3, 17, 28, 31 y 32.
- De ellos, los biomas 17, 31 y 32 muestran varias combinaciones donde se prevé su desaparición absoluta.
- El bioma 4 (halobioma del Caribe, manglar) es el único que muestra una expansión del área para el conjunto de combinaciones escenarios/modelos. Sin embargo, el manglar 14 (halobioma del Pacífico) muestra una reducción muy significativa, quedando de media en un 39% de la superficie potencial actual.
- Por tipo de bioma tenemos los cambios medios siguientes, de menos a más afectados: helobiomas, 78%; halobiomas, 73%; orobiomas, 51%; zonobiomas, 29%.

Matrices de transición

A partir de los datos generales anteriores se ha realizado un conjunto de análisis más detallados con el fin de ofrecer datos específicos de la evolución de cada bioma en cada combinación escenario/modelo para todas las categorías de idoneidad. Los gráficos de este apartado se han elaborado a partir de ejecutar el siguiente proceso:

Los mapas de idoneidad actuales contienen valores en el rango 0-1, donde un valor de 0 indica incompatibilidad para el bioma considerado y un valor de 1 indica idoneidad. Estos mapas se han reclasificado en 10 clases con un ancho de clase de 0,1. Por ejemplo, la clase 1 corresponde al rango de valores 0,00-0,10; la clase 2 a 0,11-0,20, etc. Consecuentemente, las clases inferiores señalan las zonas menos adecuadas para el bioma mientras que las superiores señalan las zonas idóneas en una gradación continua.

Este mismo proceso de reclasificación se hizo con todos los mapas resultantes de aplicar el modelo MAXENT a las situaciones futuras. El objetivo es combinar el mapa actual con cada mapa futuro para ver no solo la ampliación/reducción de área general sino las transiciones de cada clase de idoneidad entre la situación actual y la futura. La combinación se realiza con el sistema de información geográfica y se genera una tabla de doble entrada donde cada casilla o celda indica el porcentaje de transición entre la clase actual y la futura.

Por ejemplo, en la **Tabla 13** vemos que la casilla 2/1 muestra un valor de 13,12; eso significa que un 13,12% de los valores 2 en la actualidad han pasado a ser valor 1 en el escenario futuro, es decir, la situación ha empeorado. Lógicamente, las transiciones más interesantes son las que afectan a las clases "mejores" que puedan descender a clases inferiores e el futuro. Por ejemplo, en la casilla 5/1 vemos un valor de 11,25 lo cual indica que este porcentaje de clase 5 (aceptable) ha caído a la clase 1 (incompatible).

Los valores se han coloreado de acuerdo con su magnitud, desde el verde (cambios mínimos o sin cambio) hasta el rojo (cambios máximos). El empeoramiento de una situación se verá reflejado si dominan los tonos rojos en la mitad inferior izquierda del gráfico (por debajo de la diagonal principal) ya que en esa zona se representan los cambios de mejor a peor. Por encima de la diagonal principal se representan los cambios a mejor, de una clase a clases más altas. Los tonos rojos en esta zona representan situaciones beneficiosas, donde la idoneidad aumenta de forma general.

Los totales marginales representan la importancia relativa, en extensión, de las clases dentro del área potencial del bioma. En el ejemplo de la **Tabla 13** vemos que la clase 7 actual tiene un valor marginal de 0,05 lo que significa que representa solamente el 0,05% de la superficie potencial actual del bioma. Los cambios o transiciones en estos casos no son relevantes ni significativos.

La figura que acompaña a cada tabla es una representación de las transiciones dentro de cada clase. Por ejemplo, en el bioma 3, la clase 1 pasa de representar un 14,5% en la actualidad a un 43,5% en el futuro A2/CCCMA. Se ha creído conveniente mostrar estos cambios en una figura específica como la **Figura 55** para el ejemplo comentado donde el porcentaje actual se muestra en verde oscuro y el futuro en verde claro. Las barras verde oscuro muestran, por tanto, la importancia de cada clase en la actualidad y las verde claro la importancia en el futuro. La reducción de la longitud de las barras de clase alta (5 o mayor) supone un empeoramiento equivalente de las zonas adecuadas para el bioma. Eso es lo que ocurre, por ejemplo, con las clases 4, 5 y 6 en el ejemplo: la barra verde claro es menor que la verde oscuro lo que señala una reducción de las respectivas superficies.

Por la brevedad exigida en esta convocatoria se presenta un subconjunto bastante limitado de los análisis: solamente los relativos al escenario A2 y modelos CCCMA y CSIRO. En el trabajo original se han elaborado las tablas y gráficos equivalentes para el escenario B2 y el modelo HADAM3H.

Zonobioma del bosque seco tropical del Caribe (cód. 3)

Combinación A2/CCCMA

La matriz muestra los mayores cambios en las transiciones 2-1 (poco relevante) y 5-1 (importante) aunque las pérdidas de idoneidad son generales tal como muestran los valores de las primeras columnas indicando una reducción general del bosque respecto a la situación actual.

	A2CC								
ACTUAL	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
1		4,70	4,40	3,27	1,37	0,67	0,05	0,01	14,47
2	13,12	1,22	0,74	0,51	0,48	0,29	0,00	0,00	16,37
3	7,41	3,40	1,52	0,53	0,24	0,18	0,06	0,00	13,34
4	5,78	4,27	3,94	1,66	1,08	0,35	0,08	0,02	17,19
5	11,25	3,54	4,05	2,71	2,02	1,55	0,51	0,05	25,67
6	5,92	1,94	0,75	0,80	0,63	0,87	1,64	0,35	12,90
7	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,05
Total	43,48	19,08	15,41	9,51	5,81	3,92	2,35	0,44	100,00

Tabla 13. Matriz de transición Actual a A2/CCCMA para el bioma 3.

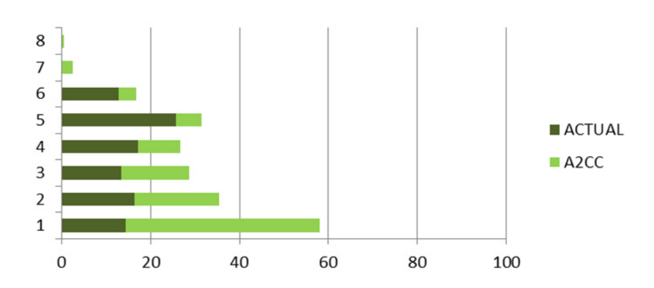


Figura 55. Superficie en % de cada clase de idoneidad en la actualidad vs A2/CCCMA para el bioma 3.

Los cambios generales de superficies para el bioma 3 son el incremento de la clase 1 (incompatible con el bosque) a casi el triple y la fuerte reducción de las clases más adecuadas, especialmente 5 y 6. El efecto general es la pérdida de superficie idónea y la disminución del bosque en el futuro con respecto a su situación actual.

Combinación A2/CSIRO

De forma similar al caso del modelo CCCMA, la matriz muestra los mayores cambios en las transiciones 2-1 (poco relevante), 5-1 y 5-2 (importantes). Las pérdidas de idoneidad son generales tal como muestran los valores de la primera y segunda columnas, indicando una reducción general del bosque respecto a la situación actual.

	A2CS								
ACTUAL	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
1		4,06	4,12	2,96	0,78	0,30	0,00	0,00	12,22
2	13,98	1,01	0,60	0,56	0,53	0,13	0,00	0,00	16,81
3	8,78	2,05	1,76	0,59	0,32	0,19	0,00	0,00	13,69
4	7,22	3,35	3,09	2,15	1,46	0,35	0,02	0,00	17,64
5	9,28	8,95	3,30	2,26	2,13	0,42	0,00	0,00	26,35
6	5,16	2,12	1,60	1,29	1,84	1,18	0,06	0,00	13,24
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,01	0,00	0,05
Total	44,42	21,52	14,47	9,80	7,07	2,61	0,10	0,01	100,00

Tabla 14. Matriz de transición Actual a A2/CSIRO para el bioma 3.

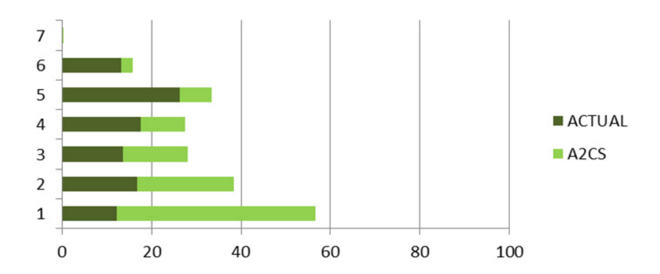


Figura 56. Superficie en % de cada clase de idoneidad en la actualidad vs A2/CSIRO para el bioma 3.

Los cambios generales de superficie para el bioma 3 son el incremento de la clase 1 (incompatible con el bosque) a casi el cuádruple y la fuerte reducción de las clases más adecuadas, desde la 4 hasta la 6. El efecto general es la pérdida de superficie idónea y la disminución del bosque en el futuro con respecto a su situación actual.

Halobioma del Caribe (manglar, cód. 4)

Combinación A2/CCCMA

La matriz muestra los mayores cambios en las transiciones 2-1, 3-1, 1-2 y 1-3. Las pérdidas de idoneidad se reparten entre los valores de la primera columna y la primera fila. Esto indica cambios poco significativos respecto a las superficies de alta idoneidad aunque sí un cambio de localización.

	A2CC								
ACTUAL	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
1		11,11	11,93	4,78	5,68	0,38	0,00	0,00	33,88
2	22,18	1,23	2,31	1,10	1,22	0,33	0,00	0,00	28,37
3	10,93	1,18	2,15	0,72	0,29	0,03	0,00	0,00	15,31
4	3,47	1,01	1,22	0,69	1,20	0,33	0,00	0,00	7,92
5	3,39	0,74	0,96	0,59	0,66	0,22	0,00	0,00	6,57
6	4,47	0,59	0,62	0,33	0,44	0,93	0,17	0,00	7,55
7	0,08	0,13	0,15	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,40
Total	44,52	16,01	19,34	8,20	9,51	2,26	0,17	0,00	100,00

Tabla 15. Matriz de transición Actual a A2/CCCMA para el bioma 4.

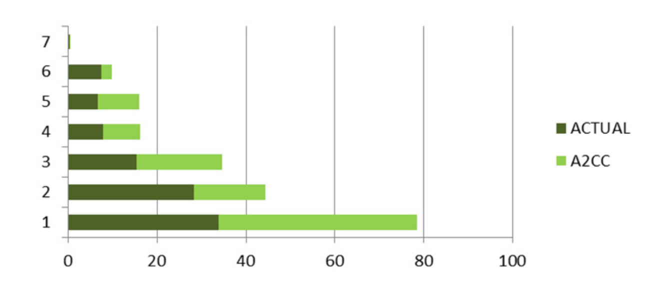


Figura 57. Superficie en % de cada clase de idoneidad en la actualidad vs B2/Hadam3H en el bioma 4.

Los cambios generales de superficie para el bioma 4 son poco significativos salvo por el leve incremento de la clase 5 y la pérdida de más de la mitad de la clase 6. El efecto general es una ligera pérdida de superficie idónea y la pequeña disminución del bosque en el futuro con respecto a su situación actual.

Combinación A2/CSIRO

De forma similar al caso del modelo CCCMA, la matriz muestra los mayores cambios en las transiciones 2-1, 1-2 y 1-3, poco relevantes aunque puede sostenerse un pequeño aumento de la zona compatible con el bosque respecto a la situación actual.

	A2CS								
ACTUAL	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
1		28,91	12,30	3,60	3,36	2,39	0,39	0,08	51,03
2	15,70	1,75	1,42	0,32	0,62	1,01	0,11	0,08	21,01
3	7,18	1,39	1,64	0,75	0,29	0,07	0,02	0,00	11,34
4	2,13	0,41	0,71	1,54	0,70	0,33	0,04	0,00	5,87
5	1,89	0,38	0,23	0,68	0,77	0,85	0,05	0,00	4,86
6	2,63	0,43	0,31	0,19	0,52	0,80	0,70	0,01	5,59
7	0,05	0,08	0,14	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,29
Total	29,57	33,36	16,75	7,11	6,26	5,47	1,31	0,18	100,00

Tabla 16. Matriz de transición Actual a A2/CSIRO para el bioma 4.

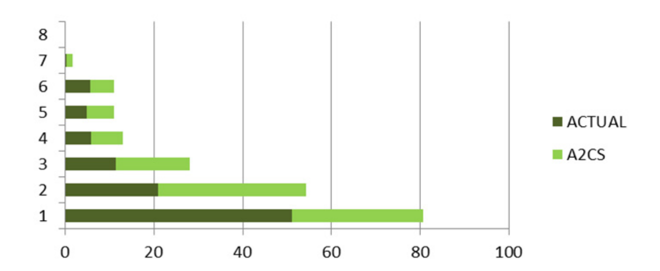


Figura 58. Superficie en % de cada clase de idoneidad en la actualidad vs A2/CSIRO para el bioma 4.

Los cambios generales de superficie para el bioma 4 son la disminución de la clase 1 (incompatible con el bosque) y el ligero aumento de las clases 5, 7 y 8 y el mantenimiento de la 6. El efecto general es una ganancia moderada de superficie idónea para el bosque respecto a su situación actual.

Helobiomas del Pacífico y Atrato (cód. 13)

Combinación A2/CCCMA

La matriz muestra los mayores cambios en las transiciones 1-2 ya que la 2-1 y 1-3 no son muy significativas. Esto indica una leve ganancia del bosque respecto a la situación actual.

	A2CC							
ACTUAL	1	2	3	4	5	6	7	Total
1		30,34	4,20	1,27	2,59	1,39	0,18	39,97
2	6,77	1,95	0,76	1,03	1,44	4,39	0,39	16,72
3	0,71	0,44	0,19	0,20	0,32	1,04	0,33	3,22
4	1,03	0,27	0,67	0,30	0,51	1,73	0,11	4,63
5	3,87	1,51	1,39	1,56	3,21	6,73	0,41	18,67
6	2,33	0,36	0,17	0,27	5,86	7,68	0,10	16,77
7	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
Total	14,72	34,89	7,38	4,62	13,92	22,96	1,51	100,00

Tabla 17 Matriz de transición Actual a A2/CCCMA para el bioma 13.

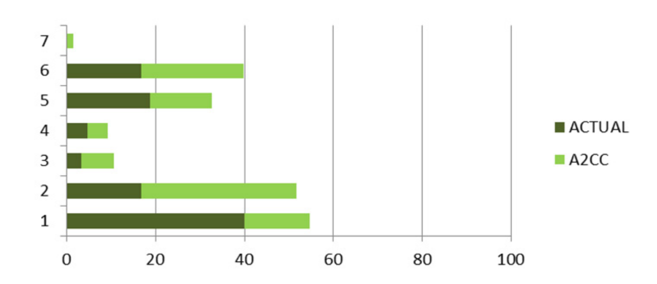


Figura 59. Superficie en % de cada clase de idoneidad en la actualidad vs A2/CCCMA para el bioma 13.

Los cambios generales de superficie para el bioma 13 son el incremento de la clase 2 (incompatible con el bosque), más del doble, y el mantenimiento de la clase 5 y el incremento de la clase 6 y 7. El efecto general es la leve ganancia de superficie idónea y el aumento del bosque en el futuro con respecto a su situación actual.

Combinación A2/CSIRO

De forma similar al caso del modelo CCCMA, la matriz muestra el mayor cambio en la transición 1-2, además de la 1-3. Las pérdidas de idoneidad no son significativas excepto en la primera fila los dos primeros valores, indicando un mantenimiento del bosque respecto a la situación actual.

	A2CS							
ACTUAL	1	2	3	4	5	6	7	Total
1		37,69	19,01	2,44	0,81	0,44	0,02	60,40
2	5,02	0,99	0,62	0,94	1,18	2,15	0,13	11,03
3	0,45	0,36	0,25	0,21	0,21	0,58	0,07	2,13
4	0,55	0,34	0,60	0,28	0,24	1,02	0,02	3,05
5	1,07	1,72	2,20	1,48	2,70	3,14	0,00	12,32
6	1,12	0,48	0,57	0,99	3,12	4,78	0,00	11,06
7	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Total	8,21	41,58	23,25	6,33	8,26	12,12	0,24	100,00

Tabla 18. Matriz de transición Actual a A2/CSIRO para el bioma 13.

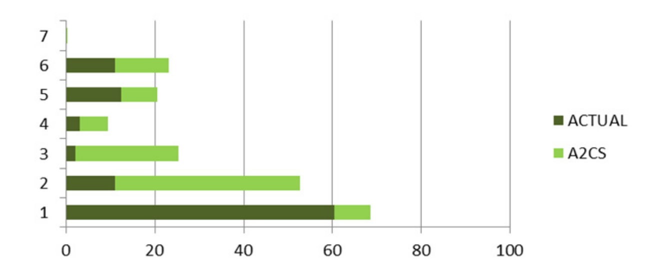


Figura 60. Superficie en % de cada clase de idoneidad en la actualidad vs A2/CSIRO para el bioma 13.

Los cambios generales de superficie para el bioma 13 son la disminución de la clase 1 (incompatible con el bosque), el aumento de la clase 2 al cuádruple y un leve incremento de las clases más adecuadas, desde la 4 a la 6. El efecto general es el mantenimiento de la superficie idónea y la conservación del bosque en el futuro con respecto a su situación actual.

Halobioma del Pacífico (cód. 14)

Combinación A2/CCCMA

La matriz muestra los mayores cambios en las transiciones 2-1 y 5-1 aunque las pérdidas de idoneidad son generales tal como muestran los valores de la primera columna. Esto indica una reducción general del bosque respecto a la situación actual.

	A2CC						
ACTUAL	1	2	3	4	5	6	Total
1		8,78	3,69	2,39	4,10	0,02	18,97
2	14,17	1,05	0,15	0,12	0,08	0,00	15,57
3	6,69	0,12	0,25	0,05	0,02	0,04	7,17
4	7,61	0,33	0,42	0,59	0,29	0,01	9,24
5	21,33	2,61	0,79	2,70	2,65	3,43	33,51
6	5,10	0,03	0,25	0,52	3,06	6,59	15,54
Total	54,91	12,92	5,54	6,35	10,20	10,09	100,00

Tabla 19 Matriz de transición Actual a A2/CCCMA para el bioma 14.

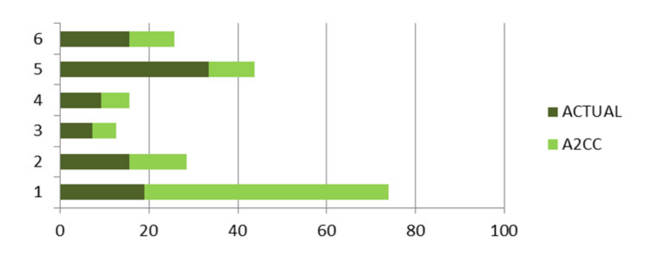


Figura 61. Superficie en % de cada clase de idoneidad en la actualidad vs A2/CCCMA para el bioma 14.

Los cambios generales de superficie para el bioma 14 son el incremento de la clase 1 (incompatible con el bosque) a casi el triple y la fuerte reducción de las clases más adecuadas, especialmente 5 (tres veces menos) y 6. El efecto general es la pérdida de superficie idónea y la disminución del bosque en el futuro con respecto a su situación actual.

Combinación A2/CSIRO

De forma similar al caso del modelo CCCMA, la matriz muestra los mayores cambios en las transiciones 2-1, 5-1 y 1-3. Las pérdidas de idoneidad son generales tal como muestran los valores de la primera columna, indicando una reducción general del bosque respecto a la situación actual.

	A2CS						
ACTUAL	1	2	3	4	5	6	Total
1		7,53	7,79	2,80	3,75	0,10	21,98
2	12,81	0,30	1,22	0,55	0,10	0,02	15,00
3	5,71	0,31	0,64	0,13	0,00	0,10	6,90
4	5,95	0,12	1,89	0,27	0,34	0,32	8,89
5	14,37	0,10	4,54	5,50	2,72	5,04	32,27
6	4,65	0,00	0,52	0,82	3,73	5,24	14,96
Total	43,49	8,37	16,60	10,07	10,65	10,81	100,00

Tabla 20 de transición Actual a A2/CSIRO para el bioma 14.

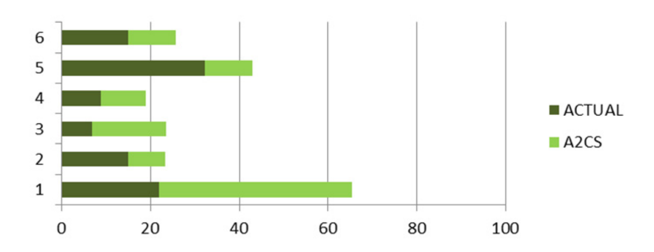


Figura 62 Superficie en % de cada clase de idoneidad en la actualidad vs A2/CSIRO para el bioma 14.

Los cambios generales de superficie para el bioma 14 son el incremento de la clase 1 (incompatible con el bosque) a más del doble y la fuerte reducción de las clases más adecuadas, la 5 y 6. El efecto general es la pérdida de superficie idónea y la disminución del bosque en el futuro con respecto a su situación actual.

Zonobioma húmedo tropical del Magdalena y Caribe (cód.15)

Combinación A2/CCCMA

	A2CC								
ACTUAL	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
1		23,69	5,51	1,05	0,10	0,03	0,00	0,00	30,39
2	21,80	4,23	2,76	1,30	0,40	0,20	0,03	0,00	30,73
3	2,36	1,31	1,33	0,99	0,75	0,36	0,08	0,01	7,20
4	1,72	0,71	0,49	0,64	0,83	1,42	0,25	0,07	6,13
5	5,84	0,58	1,05	0,68	1,63	3,44	2,68	0,07	15,96
6	4,68	0,28	0,53	0,20	0,29	1,17	2,06	0,18	9,39
7	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,01	0,05	0,10	0,20
Total	36,40	30,81	11,70	4,86	4,00	6,63	5,15	0,44	100,00

Tabla 21 Matriz de transición Actual a A2/CCCMA para el bioma 15.

La matriz muestra los mayores cambios en las transiciones 2-1 y 1-2. No son significativas las pérdidas de idoneidad, aunque son generales como muestran los valores de la primera columna. Esto indica una leve reducción general del bosque respecto a la situación actual tal como se sintetiza en la Figura 55.

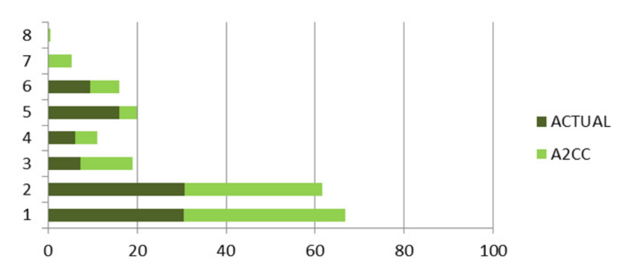


Figura 63. Superficie en % de cada clase de idoneidad en la actualidad A2/CCCMA para el bioma 15.

Los cambios generales de superficie para el bioma 15 son el leve incremento de la clase 1 (incompatible con el bosque) y la pequeña reducción de las clases más adecuadas, especialmente 5 y 6, con un ligero aumento de la clase 7. El efecto general es la pérdida de superficie idónea y la disminución del bosque en el futuro con respecto a su situación actual.

Combinación A2/CSIRO

	A2CS								
ACTUAL	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
1		12,27	21,20	2,23	0,25	0,08	0,00	0,00	36,03
2	16,30	3,25	5,62	2,13	0,41	0,52	0,02	0,00	28,24
3	1,98	0,59	1,12	1,87	0,87	0,16	0,02	0,00	6,61
4	1,82	0,10	0,17	0,69	2,03	0,75	0,08	0,00	5,64
5	5,25	0,50	0,18	0,13	2,95	4,54	1,12	0,01	14,67
6	4,44	0,15	0,09	0,07	0,24	2,28	1,37	0,00	8,63
7	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	0,10	0,04	0,18
Total	29,79	16,86	28,38	7,12	6,74	8,35	2,71	0,05	100,00

Tabla 22. Matriz de transición Actual a A2/CSIRO para el bioma 15.

De forma similar al caso del modelo CCCMA, la matriz muestra los mayores cambios en las transiciones 2-1, 1-2 y 1-3. Las pérdidas de idoneidad no son significativas tal como muestran los valores de la primera columna, indicando una leve reducción general del bosque respecto a la situación actual tal como se sintetiza en la Figura 56113.

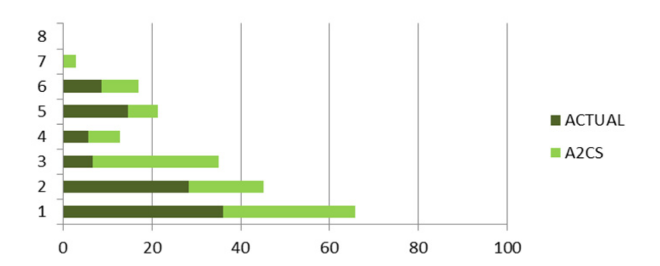


Figura 64. Superficie en % de cada clase de idoneidad en la actualidad A2/CSIRO para el bioma 15.

Los cambios generales de superficie para el bioma 15 son la disminución de la clase 1 y aumento de la clase 3 y la reducción de las clases más adecuadas, desde la 5 hasta la 8. El efecto general es la pérdida de superficie idónea y la disminución del bosque en el futuro con respecto a su situación actual.

Helobiomas de Magdalena y Caribe (cód. 16)

Combinación A2/CCCMA

	A2CC									
ACTUAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
1		12,81	5,54	4,54	3,74	2,10	0,59	0,05	0,01	29,38
2	9,47	0,93	1,04	1,58	2,70	2,15	0,87	0,15	0,00	18,90
3	6,19	0,67	1,07	0,92	1,49	3,14	1,29	0,22	0,00	14,99
4	5,68	0,48	0,60	0,68	1,08	1,99	0,73	0,14	0,00	11,37
5	8,21	0,48	0,43	0,25	0,44	0,90	0,72	0,01	0,00	11,43
6	12,49	0,15	0,12	0,14	0,18	0,32	0,32	0,01	0,00	13,72
7	0,16	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,20
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Total	42,20	15,52	8,81	8,11	9,65	10,61	4,52	0,57	0,01	100,00

Tabla 23. Matriz de transición Actual a A2/CCCMA para el bioma 16.

La matriz muestra los mayores cambios en las transiciones 6-1 y 1-2 siendo las pérdidas de idoneidad generales en la primera columna y fila, aunque no son significativas. Esto indica una reducción leve del bosque respecto a la situación actual tal como se sintetiza en la Figura 55.

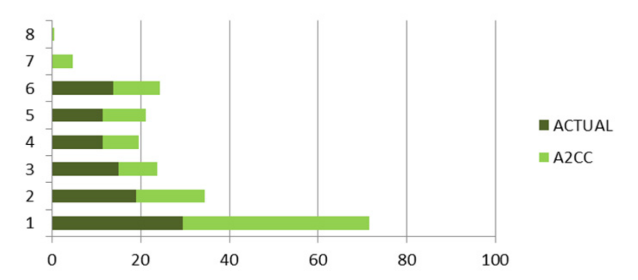


Figura 65. Superficie en % de cada clase de idoneidad en la actualidad vs A2/CCCMA para el bioma 16.

Los cambios generales para el bioma 16 son el leve incremento de la clase 1, una mínima reducción de las clases más adecuadas, especialmente 5 y 6, y un aumento de la clase 7. El efecto general es una pequeña pérdida de superficie idónea.

Combinación A2/CSIRO

	A2CS									
ACTUAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
1		32,64	11,57	6,74	1,94	0,40	0,03	0,00	0,00	53,32
2	5,76	0,68	1,02	1,80	2,20	0,80	0,23	0,00	0,00	12,49
3	3,54	0,41	0,61	1,09	2,10	1,80	0,35	0,00	0,00	9,90
4	2,92	0,44	0,39	0,56	1,34	1,40	0,32	0,16	0,00	7,51
5	4,03	0,69	0,53	0,45	0,87	0,82	0,10	0,06	0,00	7,55
6	7,38	0,49	0,21	0,32	0,31	0,32	0,04	0,00	0,00	9,06
7	0,11	0,00	0,00	0,01	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,16
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	23,74	35,35	14,32	10,98	8,79	5,54	1,06	0,22	0,00	100,00

Tabla 24. Matriz de transición Actual a A2/CSIRO para el bioma 3.

De forma distinta al caso del modelo CCCMA, la matriz muestra los mayores cambios en las transiciones 1-2, 1-3 y 1-4. Las pérdidas de idoneidad no son significativas tal como muestran los valores de la primera columna, indicando un mínimo aumento general del bosque respecto a la situación actual tal como se sintetiza en la Figura 56.

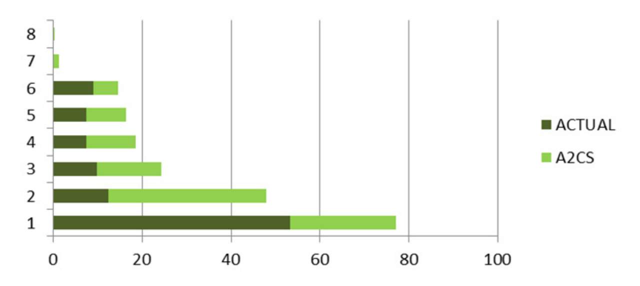


Figura 66. Superficie en % de cada clase de idoneidad en la actualidad vs A2/CSIRO para el bioma 16.

Los cambios generales de superficie para el bioma 16 son la disminución de la clase 1 y aumento de las clases 2 y 3. Las clases 4, 5 y 7 aumentan ligeramente pero disminuye la clase 6. El efecto general es la mínima pérdida de superficie idónea y la disminución del bosque en el futuro con respecto a su situación actual.

Orobioma alto de los Andes (cód. 21)

Combinación A2/CCCMA

	A2CC						
ACTUAL	1	2	3	4	5	6	Total
1		0,53	0,42	0,19	0,27	0,00	1,41
2	13,18	1,34	0,66	1,09	0,93	0,08	17,27
3	8,41	4,74	0,85	0,83	0,59	0,11	15,53
4	2,84	2,82	5,77	1,55	1,26	0,19	14,42
5	5,72	0,68	3,21	8,30	10,15	3,15	31,20
6	1,81	0,06	0,14	1,29	10,02	6,83	20,16
Total	31,95	10,16	11,06	13,26	23,22	10,36	100,00

Tabla 25. Matriz de transición Actual a A2/CCCMA para el bioma 21.

La matriz muestra los mayores cambios en la transición 2-1. Las pérdidas de idoneidad son generales tal como muestran los valores de la primera columna. Esto indica una reducción general del bosque respecto a la situación actual tal como se sintetiza en la Figura 55130.

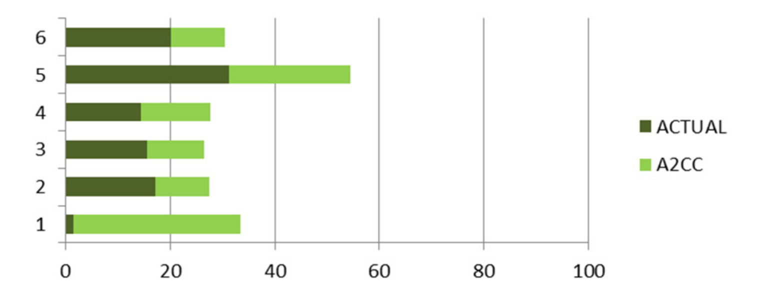


Figura 67. Superficie en % de cada clase de idoneidad en la actualidad vs A2/CCCMA para el bioma 21.

Los cambios generales de superficie para el bioma 21 son el incremento considerable de la clase 1 (incompatible con el bosque) y la reducción de las clases más

adecuadas, especialmente 5 y 6. El efecto general es la pérdida de superficie idónea y la disminución del bosque en el futuro con respecto a su situación actual.

Combinación A2/CSIRO

	A2CS						
ACTUAL	1	2	3	4	5	6	Total
1		1,93	0,54	0,30	0,53	0,01	3,32
2	11,10	1,63	0,78	0,51	2,83	0,08	16,94
3	5,85	6,31	1,35	0,18	1,39	0,15	15,23
4	0,92	3,10	5,72	1,99	2,07	0,34	14,15
5	0,05	0,19	3,03	7,52	17,13	2,68	30,60
6	0,00	0,05	0,02	0,50	11,39	7,82	19,77
Total	17,92	13,22	11,44	11,01	35,33	11,08	100,00

Tabla 26. Matriz de transición Actual a A2/CSIRO para el bioma 21.

La matriz muestra los mayores cambios en las transiciones 2-1 y 5-5. Las pérdidas de idoneidad no son generales, tal como muestran los valores de las columnas, indicando una leve reducción del bosque respecto a la situación actual tal como se sintetiza en la Figura 56131.

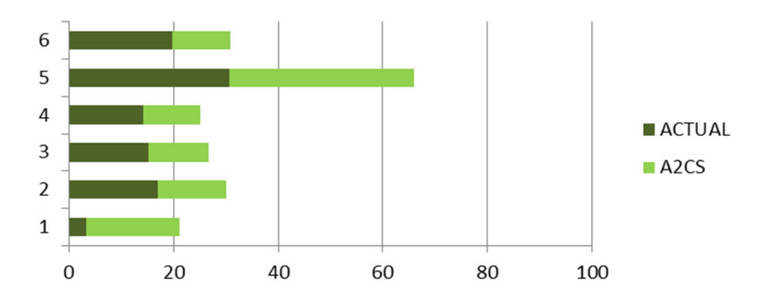


Figura 68. Superficie en % de cada clase de idoneidad en la actualidad vs A2/CSIRO para el bioma 21.

Los cambios generales de superficie para el bioma 21 son el incremento de la clase 1 (incompatible con el bosque) y el casi mantenimiento de las clases más adecua-

das, 5 y 6. El efecto general es una mínima pérdida de superficie idónea y la disminución del bosque en el futuro con respecto a su situación actual.

Conclusiones

Las técnicas de modelado predictivo están maduras, tienen una abundante bibliografía publicada y pueden ser aplicadas a cualquier lugar donde exista información sobre vegetación y variables ambientales influyentes. Este es el caso de Colombia, un país del cual no existía información elaborada consistente y solo se contaba con un pequeño proyecto piloto desarrollado en la Red CYTED FORCLIM. En esta situación, el Proyecto Fin de Carrera se ha desarrollado en estrecha colaboración con el Grupo Kraken para contribuir a la generación de modelos completos y contrastados encuadrados en una de sus líneas de investigación.

En el PFC se ha generado una gran cantidad de datos cuyo análisis detallado debemos dejar a los especialistas. Aquí se ha planificado y desarrollado un trabajo complejo en el ámbito de los Sistemas de Información Geográfica cuya utilidad es muy amplia y que se verá continuada en el Grupo Kraken con análisis similares en otros países. Debemos señalar que la interpretación de la información y de su significado biológico no ha sido nunca un objetivo del Proyecto ya que pertenece a otros campos de conocimiento como la biogeografía, ajena a la Ingeniería en Geodesia y Cartografía pero susceptible de aprovechar los datos que se le han proporcionado. En este sentido, los resultados están recogidos en los abundantes gráficos, mapas y tablas que se proporcionan y que aquí han sido comentados solo superficialmente ya que la interpretación biológica está fuera de nuestro alcance y, en su caso, generaría probablemente un documento más parecido a una tesis Doctoral que a un Proyecto Fin de Carrera.

Respecto al futuro de este y otros posibles trabajos queremos destacar la necesidad de trabajar con información climática más detallada y actualizada ya que Worldclim se generó con datos que suponen solo una parte de los realmente recogidos en las estaciones meteorológicas. Lamentablemente, los datos básicos no son accesibles por lo que se hizo necesario trabajar con la base de datos mundial, la única existente abierta y gratuita.

Agradecemos finalmente al Instituto Geográfico Agustín Codazzi de Colombia habernos proporcionado la versión digital del Mapa de Ecosistemas sin la cual, lógicamente, este trabajo no hubiera podido realizarse.

Ecuador: vegetación natural y cambio climático en los Andes de Ecuador

Christian Martínez [1], Gioconda Remache [2]
Contacto:
Fundación para la Investigación y Conservación de Ecosistemas Acuáticos
(1) vm_emkio@yahoo.com.ar
(2) gremache@hotmail.com
Quito, Ecuador

Prólogo

La vida en la Tierra se sustenta en la interrelación de procesos a todo nivel, dando paso a un sistema diverso y complejo, pero al mismo tiempo bastante frágil. A pesar de que los seres humanos recibimos permanentemente beneficios de este sistema, nuestras actividades diarias han contribuido con su deterioro y desequilibrio, poniendo en evidente riesgo nuestro bienestar y el de todas las demás formas de vida que nos rodean.

El tan debatido cambio climático es solo uno de los efectos del impacto causado contra el medio natural y ha puesto en evidencia nuestra gran vulnerabilidad. Estaremos preparados para afrontarlo?

Por ahora, los esfuerzos se han encaminado a estimar las posibles variaciones climáticas, entender sus efectos, diseñar planes de adaptación y mitigación y analizar la implementación de diferentes medidas de gestión. El presente estudio puede incluirse en el grupo de aquellos que pretenden entender sus efectos. Es así, que mediante técnicas de modelado espacial, se evaluaron los posibles efectos del cambio climático en la distribución de las formaciones vegetales en los Andes de Ecuador. Dichas aproximaciones son útiles para la planificación, a nivel local, ya que permiten diferenciar la estabilidad climática asociada a la vegetación nativa y así direccionar, de alguna manera, los esfuerzos de conservación, gestión e investigación.

Es indudable que el cambio climático desestabiliza el actual ritmo de vida que lleva la humanidad y afecta a todos los sectores. De manera global, se intenta lograr compromisos económicos y políticos para frenar la intensidad del cambio. Sin embargo, las verdaderas enmiendas deberán ocurrir primero de forma individual y personal buscando que el equilibrio del hombre con la naturaleza sea constante.

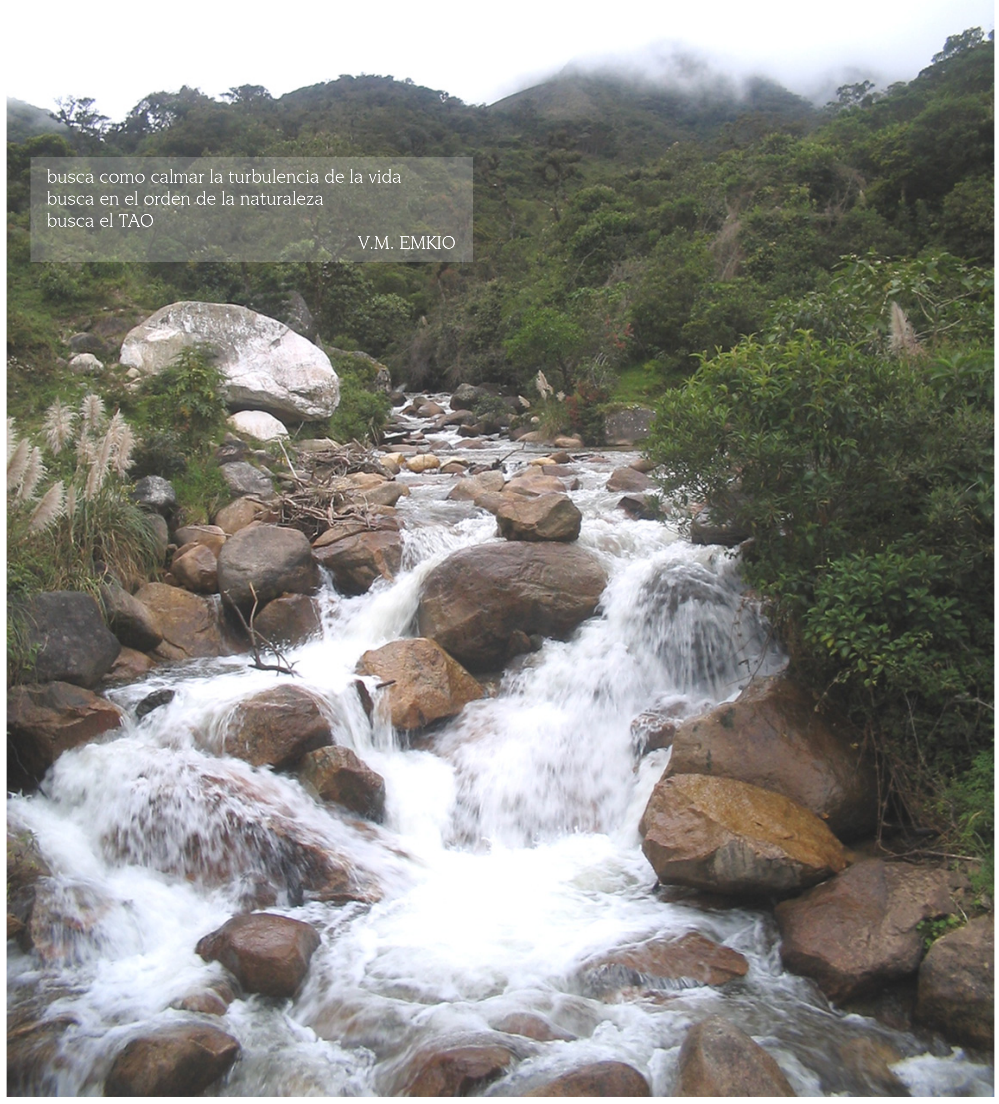


Foto: Christian Martínez

Resumen

Existe un gran interés en la evaluación de los impactos que el cambio climático ocasionaría sobre la distribución de la vida en la Tierra. Para esto, la aplicación de técnicas de modelado ecológico sobre la base de estimaciones climáticas futuras es uno de los métodos más utilizados para explorar sus posibles efectos.

Este trabajo presenta un análisis a nivel de ecosistemas. Con este fin, se proyectó la ocupación potencial de las formaciones vegetales remanentes de los Andes de Ecuador bajo los supuestos climáticos previstos para los años 2020, 2050 y 2080, según el modelo HadCM3 (escenarios A2 y B2). Los modelos de idoneidad climática de las formaciones, generados con MAXENT, fueron analizados de forma individual e integrada. Su integración consideró esquemas de dispersión nula y máxima ajustada, para obtener mapas que representen posibles escenarios extremos.

Los resultados muestran una disminución permanente del hábitat adecuado para las formaciones vegetales, cuya ocupación se restringiría altitudinal y latitudinalmente causando, principalmente, procesos de fragmentación. Los mapas obtenidos se muestran útiles para guiar acciones de conservación, manejo e investigación, pero una planificación integral requerirá considerar también posibles presiones socioeconómicas.

Agradecimientos

Nuestro sincero agradecimiento a las instituciones y personas que contribuyeron con el desarrollo de este trabajo.

Al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), por el financiamiento de la Red Iberoamericana para el estudio de ecosistemas forestales ante el cambio climático global (FORCLIM).

A la Fundación Ecuatoriana de Estudios Ecológicos, EcoCiencia, por facilitarnos el acceso al mapa de vegetación remanente de los Andes del Ecuador.

Al Dr. Ángel M. Felicísimo, coordinador de la Red FORCLIM, y a todos los integrantes de los grupos de investigación, por sus valiosos aportes, excelencia profesional y calidad humana.

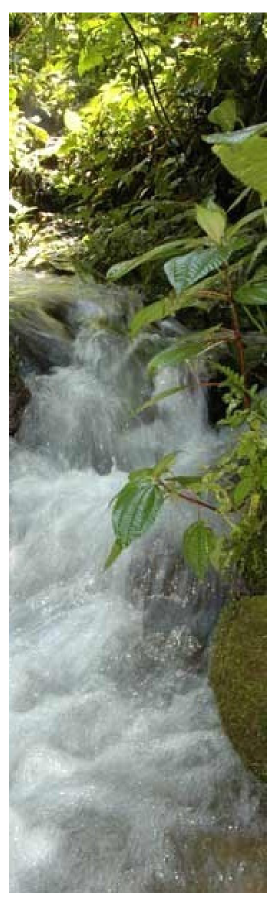
Al Dr. Jesús Muñoz, Director del Programa de Máster Biodiversidad en Áreas Tropicales y su Conservación, por su continuo apoyo en el desarrollo de este estudio.

Al Dr. Rodrigo Sierra, por facilitarnos algunas de las fotografías incluidas en esta publicación; así como a las personas que han permitido el acceso a sus fotografías mediante Wikimedia Commons.

Durante el desarrollo de este estudio, se presentó ante la Universidad Internacional Menéndez Pelayo (UIMP, España) un trabajo Fin de Máster como requisito para que uno de los autores obtenga el título de M.Sc. en Biodiversidad en Áreas Tropicales y su Conservación.

Introducción

Durante las últimas décadas se han registrado modificaciones climáticas anómalas a los patrones habituales. Según el Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC), desde 1990 se han registrado años con temperaturas muy elevadas, situándolos incluso como los años más calurosos desde 1850. Además, este siglo registró un incremento térmico de 0,74 ºC, tendencia mayor a la observada durante el siglo anterior donde el incremento fue de 0,6 ºC (IPCC, 2007). Como efecto de este calentamiento se ha observado el aumento del nivel medio del mar, así como la reducción de casquetes polares y glaciares de montaña (Fig. 1). Asimismo, modificaciones en los patrones de precipitación y la mayor frecuencia, persistencia e intensidad de los impactos de eventos extremos, como el Fenómeno del Niño, durante los últimos 30 años (IPCC, 2001), aportan evidencias físicas del cambio climático.


Foto: Fundación AGUA

El calentamiento observado en las últimas décadas responde, principalmente, al incremento de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI). Gases como el dióxido de carbono (CO2), óxido nitroso (N2O) o metano (CH4) se generan con el uso de combustibles fósiles, aerosoles, la deforestación o actividades agrícolas (Hughes, 2000; IPCC, 2007). La continua demanda de recursos mantendría o elevaría los niveles de emisiones cuya creciente concentración en la atmósfera acelera el calentamiento. Estos gases presentan alta permanencia en la atmósfera por lo que, a pesar de que las emisiones cesaran, sus efectos se mantendrían por largo tiempo.

Los futuros niveles de las emisiones de gases de efecto invernadero son inciertos y dependerán de la estructura social, económica y política mundial (IPCC, 2000). Sin embargo, el IPCC ha diseñado una serie de escenarios (SRES) (Fig. 2) que, al considerar los ejes económico y ambiental en el marco de patrones de desarrollo global o local, muestran un panorama general de las posibles estructuras mundiales futuras (Arnell et al., 2004). Estos escenarios estiman las futuras emisiones de GEI y cubren un rango amplio. Por ejemplo, estiman que para el año 2100 las emisiones de CO2 disminuirán un 4% (escenario B1) o aumentarán un 320% (escenario A2) si se compara con las estimaciones para el año 2000 (Hulme y Serrad, 1999).

La integración de estos escenarios a modelos climáticos ha permitido hacer estimaciones sobre el clima futuro; este rango de modelos predice un incremento en la

temperatura promedio de la superficie del planeta entre 1,4° C a 5,8° C para el período 1990-2100 (0,1 a 0,4 °C por década) (IPCC-TGCIA, 2006).

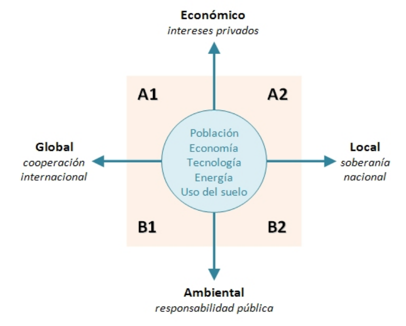


Figura 69. Esquema conceptual de los escenarios de emisiones SRES (IPCC, 2000).

Los cambios esperados en el clima tendrán una afectación global pero su distribución no será homogénea, alterando, entre otros, los patrones de distribución de la biota en la Tierra. Varios estudios (e.g. Pearson y Dawson, 2003; Thuiller, 2004; Broennimann et al., 2006) reconocen que el incremento del calentamiento global ocasionaría variaciones en los rangos de distribución de especies y en la composición de las comunidades, desplazamientos (altitudinales y/o latitudinales) de comunidades vegetales y cambios en el funcionamiento de los ecosistemas. Previsiblemente, estos efectos podrían ser más dramáticos en ecosistemas de montaña (Beniston et al., 1997) por la diversidad biológica asociada a su variabilidad altitudinal.

La respuesta de los ecosistemas a las alteraciones climáticas se ha abordado desde dos perspectivas: movimiento y modificación (IPCC, 2002). El enfoque de movimiento considera a los ecosistemas como entidades homogéneas que se desplazarían a sitios donde las condiciones climáticas sean similares a las actuales. Este enfoque, aunque simplifica la variabilidad interna de los ecosistemas, es útil para mostrar patrones generales de cambio que pudiesen afectar a asociaciones vegeta-



Foto: Christian Martínez

les. A su vez, el enfoque de modificación reconoce que cada especie tendrá patrones de respuesta distintos, y en función de sus capacidades de adaptación y/o dispersión, ocurrirían desplazamientos, adaptaciones fisiológicas o extinciones locales (Holt, 1990; Huntley et al., 1995) que modificarían la composición de los ecosistemas conocidos en la actualidad (Chapin et al., 2000; Hobbs et al., 2006). Este enfoque, aunque más realista, requiere de un conocimiento muy detallado de la biología de las especies y de sus interacciones ecológicas. La Figura 3 grafica estos dos enfoques.

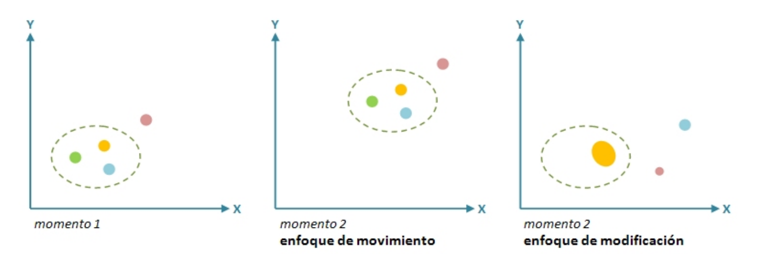


Figura 70. Respuesta de los ecosistemas ante alteraciones climáticas según los enfoques de movimiento y modificación.

La exploración de los posibles efectos del cambio climático sobre la biodiversidad se ha apoyado en el modelado ecológico (e.g. Iverson y Prasad, 1998; Bakkenes et al., 2002; Thuiller, 2004). Esta técnica permite definir el área de ocupación potencial de un organismo a partir de las relaciones existentes entre condiciones ambientales y los sitios de presencia (Guisan y Zimmermann, 2000; Muñoz y Felicísimo, 2004). Por lo tanto, el área potencial agrupa los sitios que se muestran más adecuados o idóneos según sus características ambientales.

Si se cuenta con estimaciones futuras de las condiciones ambientales es posible proyectar los modelos y así evaluar las modificaciones de las zonas potenciales bajo diversos escenarios El uso exclusivo de variables climáticas permite definir solamente el rango o nicho bioclimático, pero incluir en el modelo ciertas consideraciones sobre dispersión, disturbios y disponibilidad de recursos afinará los resultados acercándolos a la definición de nicho realizado (Guisan y Thuiller, 2005).

En Ecuador, zona de gran diversidad biológica, se ha evaluado el impacto del cambio climático a nivel de especies de flora y/o fauna (e.g. Cuesta-Camacho et al., 2006; Delgado, 2008) mediante la proyección de su ocupación potencial bajo los supuestos de escenarios futuros.

Delgado (2008) reconoce que el impacto no se distribuirá de forma homogénea y a pesar de que los patrones de riqueza se mantendrían estables, las altas tasas de recambio de especies sugieren patrones de alteración asociados a desplazamientos altitudinales y latitudinales (Fig. 4).

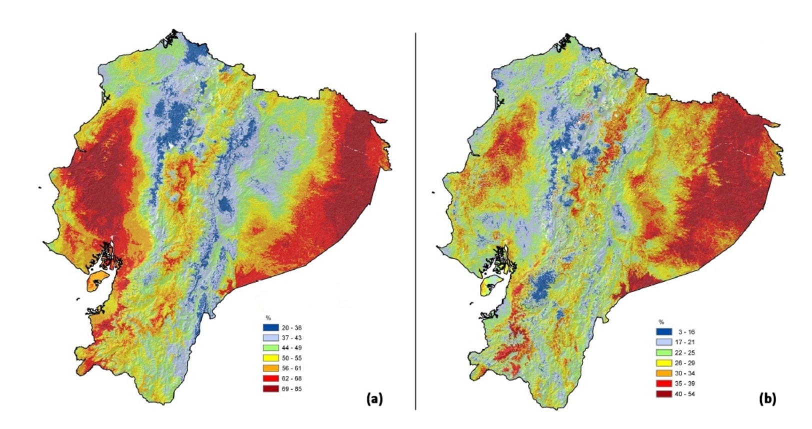


Figura 71. Patrones de recambio temporal de flora en Ecuador. Dispersión ilimitada (a) y sin dispersión (b). (Delgado, 2008).

Además, reconoce una dinámica importante en la zona andina, ya que se convertiría en un refugio para ciertas especies de tierras bajas pero a la vez, muchas especies altoandinas se verían muy amenazadas.

Considerando dichas estimaciones, el presente estudio se centró en la zona andina de Ecuador y analizó el impacto del cambio climático a nivel de ecosistemas. Utilizando el enfoque de movimiento de ecosistemas, se proyectó la distribución de las formaciones vegetales según los escenarios A2 y B2, restringiendo su ocupación a las actuales zonas naturales. Las proyecciones se hicieron hacia los años 2020, 2050 y 2080 para visualizar los patrones espaciales y temporales del cambio.

El esquema propuesto es válido bajo los supuestos de homogeneidad al interior de cada formación vegetal y de que su representatividad actual es suficiente para caracterizar su nicho climático.



Foto: Wikimedia Commons　　Foto: Christian Martínez

Objetivos

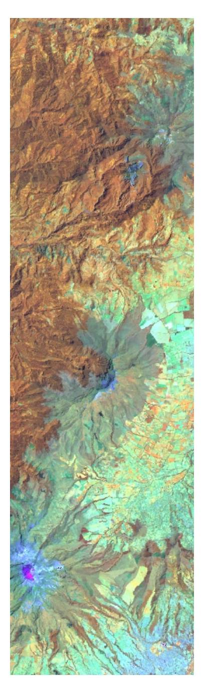
Objetivo general: evaluar los efectos del cambio climático en la distribución espacial de los ecosistemas remanentes de los Andes de Ecuador.

Objetivos específicos

- Generar modelos de idoneidad para las formaciones vegetales remanentes, considerando las condiciones climáticas actuales.
- Proyectar la distribución potencial de cada formación sobre la base de las variaciones climáticas estimadas para los escenarios futuros.
- Identificar los patrones de cambio de los ecosistemas al integrar los resultados de los modelos de distribución de cada formación vegetal.

Descripción del área de estudio

Geografía



La región andina de Ecuador cubre una superficie aproximada de 106.647 km^2. Se extiende de Sur a Norte entre los paralelos -5°2' y 1°11' y altitudinalmente entre las cotas 400 m al occidente y 800 m al oriente. Cubre una longitud aproximada de 690 km con un ancho entre 120 y 200 km y un rango altitudinal entre 400 y 6.268 m en la cima del Chimborazo (Fig. 5).

Esta región de los Andes está configurada, en la zona sur, por una sola cordillera, mientras que en las zonas centro y norte esta cordillera se divide en dos ramales (cordilleras occidental y oriental) separados por el valle o callejón interandino, una depresión intramontana de menos de 40 km de ancho (Baquero et al., 2004).

Una gran diversidad climática caracteriza esta región. La temperatura, correlacionada con la variabilidad altitudinal, disminuye aproximadamente 0,6°C por cada 100 m de ascenso, sin embargo, la cercanía a los nevados y la influencia de las corrientes amazónicas y costeras modifican los patrones térmicos de la región. A su vez, la precipitación es más compleja y depende principalmente de variaciones en la velocidad y dirección del viento, así como de las características del relieve. De esta forma, se observan distintos patrones y regímenes pluviales en las zonas altas, el callejón interandino y las vertientes externas de las cordilleras.

La combinación de factores orográficos y climáticos, sumada a una variedad edáfica, geológica y geomorfológica (Hofstede et al., 1998) ha permitido que en esta zona se conformen diversos hábitats que acogen una gran riqueza biológica. De hecho, esta zona forma parte de uno de los puntos calientes (hotspots) de biodiversidad, el denominado "Andes Tropicales" (Myers et al., 2000). Jørgensen y León (1999) reconocen que la mayor diversidad florística

de Ecuador se ubica en la región andina, en donde se han registrado 9.865 especies; un 64% del total nacional.

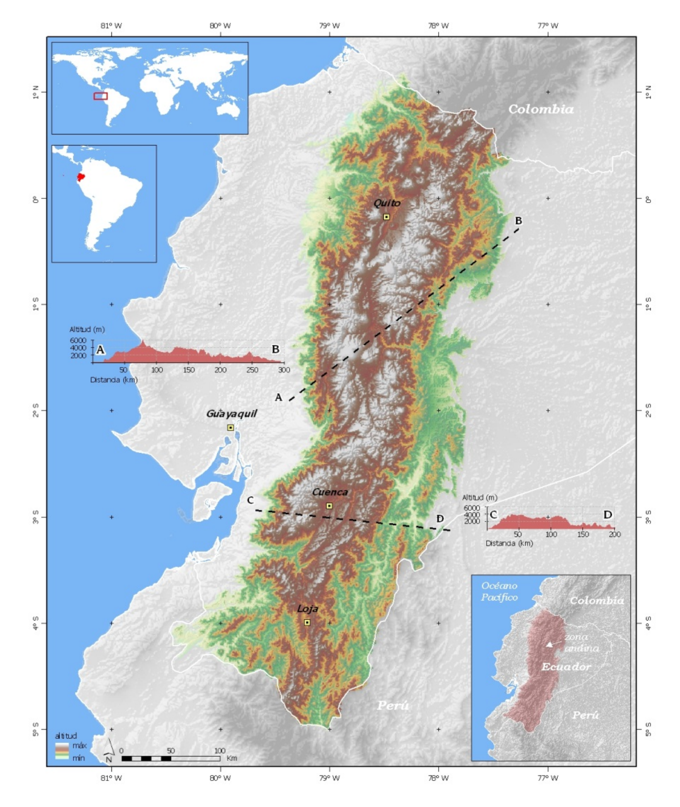


Figura 72. Mapa de la zona andina de Ecuador y perfiles altitudinales.

Formaciones vegetales

A nivel de paisaje, el estudio de la flora puede abordarse mediante la definición de formaciones vegetales, que básicamente son unidades que guardan características similares. Su homogeneidad responde a criterios fisonómicos (estructura vegetal o formas de vida), ambientales (condiciones climáticas), bióticos (composición y fenología) y topográficos (relieve).

La propuesta de Baquero et al. (2004) reconoce para la zona andina de Ecuador 17 formaciones vegetales, y que según su representación cartográfica mantienen una superficie remanente de 70.535 km^2 (66,1% de la región). Para efectos de este trabajo, se utilizó dicha representación pero simplificando las unidades temáticas en 12 formaciones vegetales, obteniendo así cinco tipos de bosque, dos de matorrales y cinco de páramos (Fig. 6 y Tabla 1).

Tabla 27. Formaciones vegetales remanentes en la zona andina de Ecuador.

Formación	Símbolo	Superficie (km^2)	Dominancia (%)	Remanencia (%)
Bosque semideciduo montano bajo	Bsdmb	4458	6,3	77,2
Bosque siempreverde piemontano	Bsvp	8368	11,9	61,6
Bosque siempreverde montano bajo	Bsvmb	18345	26,0	72,5
Bosque de neblina montano	Bnm	11382	16,1	71,8
Bosque siempreverde montano alto	Bsvma	6894	9,8	77,1
Matorral húmedo	Mh	2120	3,0	28,7
Matorral seco	Ms	2759	3,9	50,5
Páramo arbustivo	Pa	1334	1,9	57,3
Páramo seco	Ps	666	0,9	43,1
Páramo de frailejones	Pf	505	0,7	85,9
Páramo herbáceo	Ph	13496	19,1	69,7
Superpáramo	Sp	207	0,3	100,0
	Total	*70535*	*100,0*	

Remanencia: término que se refiere a aquellos sitios que aun mantienen cobertura vegetal natural, diferenciándolos de otros cuya cobertura vegetal ha sido modificada por las actividades humanas.

Bosques

Grupo fisonómico dominado por árboles y arbustos. En los trópicos suele presentar alta diversidad de especies, poca abundancia de individuos por especie y una clara estratificación vertical.

Semideciduo montano bajo (Bsdmb). Su distribución se concentra en el sur de la cordillera occidental. Ocupa la zona transicional entre los bosques húmedos y secos, con registros de precipitación anual entre 1.000 y 2.000 mm y una estación seca de 3 a 6 meses. Altitudinalmente, se encuentra por debajo de los 1.800 m. La presencia de especies de la zona baja como *Bombacaceae* y *Myristicaceae* disminuye mientras se asciende altitudinalmente, dando paso a musgos, helechos, orquídeas y bromelias. *Erythrina echimphila*, *Erythrina smithiana* y *Erythrina fusca* son especies vegetales características de esta formación.

Siempreverde piemontano (Bsvp). Se extiende en las estribaciones exteriores de la cordillera. Ocupa la zona de transición entre la vegetación de tierras bajas y la altoandina, entre los 300 y los 1.500 m. Con épocas secas menores a 3 meses y precipitación que puede alcanzar los 3.000 mm. Presenta árboles de hasta 30 m de altura con gran concentración de epífitas y sotobosque arbustivo y herbáceo abundante en las familias *Orchidaceae*, *Araceae*, *Cyclanthaceae*, *Piperaceae* y *Gesneriaceae*. La especie clave para identificarlo es *Iriartea deltoidea.*

Siempreverde montano bajo (Bsvmb). Es la formación vegetal más dominante y su distribución abarca las cordilleras occidental y oriental. Se ubica por sobre la franja altitudinal piemontana, pudiendo alcanzar los 2.000 m. Helechos, orquídeas, musgos y bromelias son más frecuentes en los estratos medio y bajo. Además, la presencia de los géneros *Podocarpus* y *Chusquea* caracteriza los remanentes del sur de la cordillera oriental. Las especies *Fuchsia macrostigma*, *Cecropia andina*, *Cecropia montana*, *Morus insignis* y *Miconia cosangensis* son indicadoras de esta formación.



Foto:
Rodrigo Serra

De neblina montano (Bnm). Tiene amplia distribución y se extiende a lo largo de las dos cordilleras, ocupando la franja altitudinal comprendida entre los 1.500 y 3.000 m. Aquí, la temperatura es menor que en la zona baja y se presenta una constante condensación de niebla. Presenta abundancia de musgos y epífitas como orquídeas, helechos y bromelias, cuya diversidad probablemente sea la más

alta. Algunas de sus especies características son *Anthurium mindense, Anthurium penningtoni, Brunellia acostae, Piper sodiroi, Barnadesia parviflora, Oreopanax eriocephalus, Mauria simplicifolia, Hedyosmum translucidum* y *Huperzia loxensis*.



Foto:
Rodrigo Serra

Siempreverde montano alto (Bsvma). Se extiende a lo largo de la zona andina configurando la transición entre bosques y páramos. Ocupa la franja altitudinal entre 3.000 y 3.400 m en los flancos externos e internos de la cordillera. Presenta gran cantidad de musgos y plantas epífitas. Se caracteriza por el crecimiento inclinado de los tallos, algunos ramificados desde su base, por las fuertes pendientes de los sitios donde se desarrollan. Pueden encontrarse en rodales de una sola especie como el caso de *Polylepis*. Algunas especies indicadoras de esta formación son *Freziera verrucosa, Frezier canescen, Croton elegans, Gynoxis chigualensis, Brachyotum andreanum* y *Symplocos fuscata*.



Foto: Christian Martínez

Matorrales

Grupo fisonómico dominado por arbustos de altura variable (0,5 – 5 m), pudiendo encontrarse en disposiciones muy densas o dispersas con un estrato bajo de plantas herbáceas.

Húmedo (Mh). Se extiende a lo largo de los valles interandinos y al pie de la cordillera oriental hacia el sur. Su ocupación actual se concentra en quebradas con fuertes pendientes y poco accesibles, donde es difícil cambiar el uso del suelo. En zonas planas, esta formación ha sido sustituida por cultivos y plantaciones de eucalipto, habiendo perdido más del 70% de su extensión original. Su composición florística varía entre las zonas norte y sur y depende de la disponibilidad hídrica y el tipo de suelo. *Solanum crinitipes, Calceolaria crenata, Ilex rupicola, Ocotea rotundata, Oreocalis grandiflora, Saurauia crassisepala, Guzmania asplundii* y *Thibaudia harlingii* son algunas de las especies representativas de esta formación.



Foto: Christian Martínez

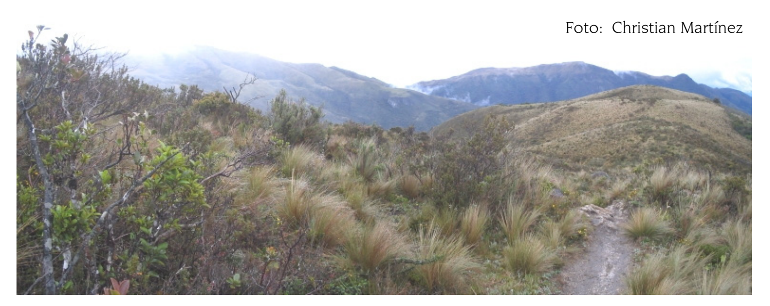
Seco (Ms). Se concentran en los valles secos interandinos, con déficit hídrico (diferencia entre evapotranspiración potencial y precipitación real) durante la mayor parte del año. En la época seca, la cobertura vegetal en el estrato inferior es escasa y los arbustos y árboles pequeños pierden sus hojas. Mientras que, en época de lluvias el paisaje se torna verde. Incluye arbustos con copas amplias, que les permiten retener humedad, plantas espinosas y algo de musgo. Son especies indicadoras de esta *formación Caesalpinia spinosa, Dodonaea viscosa, Mimosa quitensis, Mimosa púdica, Opuntia soederstromiana, Opuntia tunicata* y *Opuntia pubescens.*

Páramos

Presenta vegetación dominante no arbórea. Es característico de la zona altoandina, donde confluyen condiciones como alta irradiación ultravioleta, alta humedad y bajas temperaturas pero con variaciones térmicas diarias.

Arbustivo (Pa). De ocupación restringida al sur de la zona andina y por sobre los 3.000 m de altitud. En esta formación abundan los arbustos y las plantas en roseta distribuidas dentro de una matriz de pajonal y variadas plantas herbáceas; formando una franja de transición entre la ceja de montaña y el páramo herbáceo. Especies características de esta formación son *Valeriana convallariodes* y *Azorella pedunculata*. En el páramo arbustivo también puede encontrarse algunos árboles pequeños de los géneros *Escallonia, Polylepis* y *Gynoxis*.

Foto: Christian Martínez



Seco (Ps). Se presenta restringido a la zona central de la cordillera occidental y su distribución actual corresponde únicamente a la mitad de su distribución original. Presenta vegetación de tipo xerofítico (adaptada a vivir en condiciones de aridez), formando islas entre los suelos de arena desnudos. La especie característica de esta formación es *Astragalus geminiflorus*, que se muestra en asociación con hierbas, arbustos, poco musgo y líquenes.

De frailejones (Pf). Los frailejones (*Espeletia*) se distribuyen en los Andes desde el norte de Ecuador hasta Venezuela, aunque existe una población aberrante en los Llanganates (zona central de la cordillera oriental de Ecuador). Se ubica por sobre los 3.000 m. En esta formación, *Espeletia pycnophylla* domina el estrato arbustivo y en la cordillera oriental forma pequeños rodales en asociación con almohadillas y árboles del género *Polylepis*.

Foto: Christian Martínez



Herbáceo (Ph). Presenta amplia distribución en la zona andina y está conformada por los pajonales que dominan las tierras altas. Se presenta por sobre la ceja andina o sobre el páramo arbustivo, aproximadamente a partir de los 3.000 m en la zona norte y 2.800 m en el sur. En este ecosistema las hierbas en forma de penacho están dominadas por especies de *Stipa, Calamagrostis* y *Festuca*. Se entremezclan con algunos arbustos típicos como la chuquiragua y es característico del centro y norte de la cordillera oriental encontrarlo asociado con almohadillas, las mismas que retienen gran cantidad de agua. Especies indicadoras del páramo herbáceo son *Chuquiraga jussieui, Calamagrostis efusa, Huperzia talpiphila, Valeriana rigida, Azorella aretioides, Werneria nubigena* y *Valeriana convallariodes*.



Foto:
Christian Martínez

Superpáramo (Sp). Se localiza por debajo de los glaciares de montaña, formando una pequeña franja donde su flora está adaptada a condiciones extremas. La vegetación es dispersa y consiste principalmente en musgos y líquenes distribuidos sobre el suelo arenoso con abundantes piedras y rocas, siendo escasas las plantas superiores. Especies características de esta formación son *Aciachne flagellifera, Lecanora sp.* y *Gyrophora sp*.

Datos y métodos

Como se mencionó en la sección anterior, la ocupación geográfica de una formación vegetal sintetiza las condiciones ambientales más favorables para la presencia de la flora que la compone, sin olvidar que estos sitios de presencia representan solo una fracción del área que potencialmente podrían ocupar.

Siendo el clima un factor determinante en dicha distribución, conocer las condiciones climáticas asociadas a cada formación permitirá definir su nicho o idoneidad climática; es decir, identificar los sitios que por sus características climáticas puedan potencialmente ser ocupados por las distintas formaciones vegetales.

Proyectar estas regiones de idoneidad según las estimaciones climáticas futuras permite, de alguna forma, evaluar el posible impacto que el cambio climático tendrá en la distribución de los ecosistemas andinos de Ecuador. La Figura 7 muestra el esquema general del proceso utilizado.

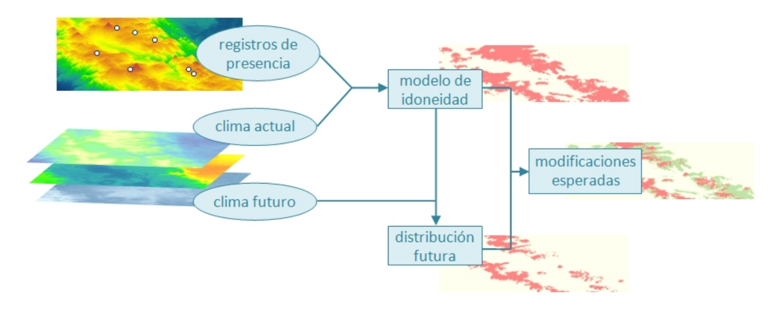


Figura 73. Esquema del proceso general.

Desarrollo de modelos de idoneidad

Datos de vegetación

Se utilizó el mapa simplificado de formaciones vegetales remanentes de los Andes de Ecuador (Fig. 6). Este mapa, inicialmente, fue generado a escala 1:250.000 y en formato vector pero, para efectos de este trabajo, fue convertido a formato raster con una resolución espacial de 30” (equivalente a 1 km) y con referencia geográfica al sistema WGS84. En este caso, cada uno de los píxeles o celdas de análisis representa un registro de la presencia de cada formación vegetal. La resolución espacial y el sistema de referencia son comunes también a los datos climáticos.

Datos climáticos

El área de estudio fue caracterizada mediante la información disponible en la base global de datos climáticos WorldClim 1.3 . Esta base está compuesta por una serie de coberturas interpoladas a partir de los promedios mensuales de temperatura y precipitación registrados por estaciones distribuidas en todo el mundo (Fig. 9) (Hijmans et al., 2005). Los datos originales incluyen registros de los períodos 1960-1990 y 1950-2000.

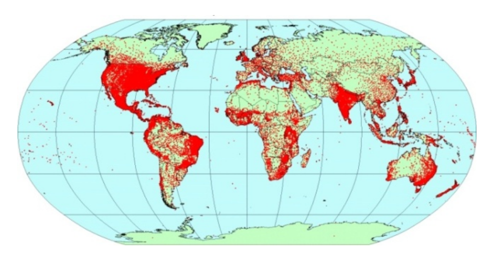


Figura 74. Ubicación de estaciones con datos de precipitación (tomado de Hijmans et al., 2005).

Se utilizaron cuatro grupos de variables climáticas con el fin de comparar su desempeño al momento de modelar la distribución potencial de las formaciones y así utilizar el mejor modelo.

El grupo 1 estuvo conformado por 36 variables que incluyen datos mensuales promedio de las temperaturas máximas y mínimas, así como la precipitación total mensual (Hijmans et al., 2005). Estos datos representan la variabilidad anual de las condiciones climáticas básicas.

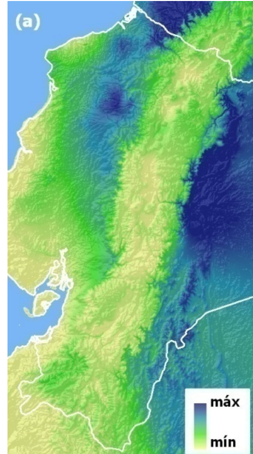
El grupo 2 fue definido por 19 variables bioclimáticas derivadas a partir de las variables básicas consideradas en el grupo 1 (Hijmans et al., 2005). Estas variables representan condiciones anuales, variación estacional y factores limitantes e incluyen datos como temperatura media anual, precipitación anual o temperaturas de los meses más cálidos y fríos (Fig. 10). Su uso ha sido considerado útil para modelar la distribución de organismos vegetales por ser buenos descriptores de procesos biológicos (Austin, 2007).

El grupo 3 conformado por cuatro variables (precipitación anual, temperatura media anual, temperatura mínima del mes más frío y temperatura máxima del mes más cálido) constituye un subconjunto del grupo 2. Estas variables han sido utilizadas en otros estudios (e.g. Peterson y Nakazawa, 2008) como descriptores simples equivalentes a los propuestos por el IPCC (Mitchell y Jones, 2005; IPCC, 2009).

Finalmente, el grupo 4, con nueve variables, describe condiciones relacionadas con el presupuesto hídrico, además de las condiciones generales de temperatura y precipitación.

Las variables seleccionadas fueron precipitación anual, temperatura promedio de las máximas mensuales, temperatura promedio de las mínimas mensuales, índice de termicidad, índice ombrotérmico, evapotranspiración potencial, índice de humedad, índice de aridez y número de meses secos. Estas variables fueron calculadas a partir de la información climática básica (grupo 1) siguiendo las propuestas metodológicas descritas en Thornthwaite (1948) y Rivas-Martínez y Rivas-Sáenz (2009).

Es posible que las variables, consideradas en cada grupo, presenten algún grado de correlación entre ellas; sin embargo, esto no supone ningún inconveniente al momento de desarrollar los modelos de idoneidad ya que el método de modelado seleccionado (MAXENT) se muestra robusto ante condiciones de multicolinealidad (Buermann, et al. 2008).



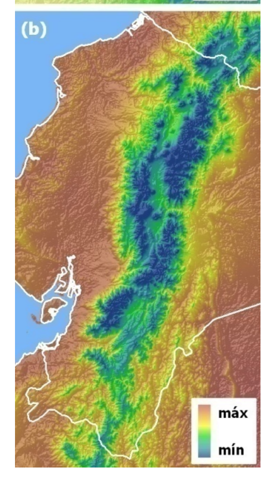


Figura 75. Precipitación anual (a) y temperatura media anual (b) para la región andina de Ecuador

Técnica de modelado

Los modelos de idoneidad climática fueron generados utilizando MAXENT, un algoritmo de aprendizaje (machine learning algorithm) basado en el principio de máxima entropía (Phillips et al., 2006; Phillips y Dudík, 2008). La distribución de probabilidad de máxima entropía, calculada por MAXENT, es entendida como la distribución más próxima a la uniforme, es decir, que la media de los valores esperados sea lo más cercana a la media de los valores observados. El valor reportado por MAXENT debe interpretarse como lo favorable que se muestra un sitio (pixel) para la presencia de la formación vegetal analizada.

Se utilizó la herramienta de acceso libre MAXENT 3.3.1 que presenta un sencillo interface para ingreso de datos y definición de parámetros. Los registros de presencia fueron ingresados en un archivo de texto (*.csv) con las coordenadas (longitud y latitud) de los centroides de cada píxel y el nombre de la formación vegetal.

Para cada formación, el 60% de los registros fueron utilizados como datos de entrenamiento (training sample) y el 40% como datos de verificación (testing sample). Además, se usó una muestra de 10.000 puntos aleatorios para caracterizar la heterogeneidad general del área de estudio (background points). Dicha heterogeneidad fue definida por las variables climáticas ingresadas como archivos de texto (*.asc).

Para cada formación vegetal, el modelo se ejecutó cuatro veces, una por cada grupo de datos climáticos. Las salidas fueron representadas en formato logístico (escala de 0 a 1) donde las zonas más idóneas muestran valores cercanos a 1.

Evaluación de modelos

Un buen modelo es aquel que predice de mejor manera la realidad observada, asignando valores altos de idoneidad a los sitios de presencia y bajos a los de ausencia. El desempeño de los modelos fue evaluado en dos dimensiones: por cada formación vegetal y como mapa consolidado.

Evaluación por formación vegetal

A nivel de formación vegetal se utilizaron dos medidas: el área bajo la curva ROC (AUC, *area under the curve*) y el puntaje de habilidad de Peirce (PSS, *Peirce skill score*).

La curva ROC (*receiver operating characteristic*) grafica la capacidad discriminativa de un modelo por la relación entre las presencias bien clasificadas (sensibilidad) y los falsos positivos (1-especificidad) (Fig. 11) considerando todos los posibles puntos de corte . Un modelo óptimo, con máxima sensibilidad y mínima especificidad, tendrá un área bajo la curva ROC (AUC) igual a 1, una clasificación aleatoria presentará un valor de AUC igual a 0,5 y valores inferiores a 0,5 indicarán mediciones sistemáticamente incorrectas. Esta medida se aplicó a los puntos de entrenamiento y a los de verificación.

El puntaje PSS (*Peirce skill score*) es definido por Eastman et al. (2005) como la diferencia entre las medias de los puntajes obtenidos en los sitios de presencia y en los de ausencia. El PSS será igual a 1 para modelos óptimos, 0 para modelos aleatorios y tomará valores negativos para modelos sistemáticamente incorrectos. Esta medida se aplicó a la totalidad de registros por formación vegetal.

Evaluación por mapa consolidado

Un mapa consolidado es la síntesis espacial de los resultados obtenidos para cada formación. Los modelos individuales son superficies continuas que ocupan toda el área de estudio, por lo que es necesario definir reglas de decisión para asignar a cada localidad (pixel) una sola categoría temática (formación vegetal).

En primer lugar, se definió el punto de corte para cada formación. Este punto permite categorizar cada modelo en zonas de presencia y ausencia, pero se debe considerar que esta simplificación está asociada a errores de omisión y comisión (Fig. 12). Se utilizó el punto de corte que maximiza la suma de la sensibilidad y la espe-

cificidad de los puntos de entrenamiento (Manel et al., 2001) minimizando los errores de omisión y comisión. La selección de este umbral ha mostrado buen desempeño en evaluaciones comparativas (Liu et al., 2005) y es equivalente al punto sobre la curva ROC más cercano al punto óptimo (Cantor et al., 1999).

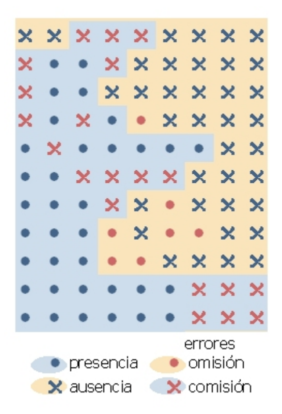


Figura 76. Errores de omisión y comisión asociados a la delimitación de zonas de presencia y ausencia.

Los mapas binarios de cada formación fueron integrados en uno solo siguiendo dos esquemas: máxima dispersión y dispersión nula. El esquema de máxima dispersión asume que una formación, teniendo la capacidad de ocupar cualquier localidad dentro de su zona de presencia, estará realmente presente si su valor de idoneidad estimado es mayor que el de las demás formaciones, es decir, aplica una función de máxima probabilidad (Fig. 13). Este esquema muestra la distribución ideal de las formaciones vegetales considerando únicamente su nicho climático. A su vez, el esquema de dispersión nula restringe la ocupación de una formación solamente a los sitios donde existe actualmente (observaciones de presencia). Este modelo mostrará las coincidencias entre la ocupación real de las formaciones y sus óptimos climáticos.

Estos dos esquemas se aplicaron a los modelos obtenidos con cada grupo de variables independientes. Los ocho mapas consolidados fueron comparados con el mapa de distribución actual de las formaciones vegetales utilizando el índice de similaridad Kappa (Rosenfield y Fitzpatric-Lins, 1986; Carstensen, 1987) y sus variaciones (Kno, Klocation y Kquantity) propuestas por Pontius (2000). Los índices Kappa y Kno evalúan el acuerdo global entre dos mapas categóricos eliminando los efectos del azar, mientras que Klocation y Kquantity evalúan su similaridad en tér-

minos de posición y cantidad. Todas estas medidas pueden tomar valores entre 0 y 1, donde 1 representa perfecta similaridad.

El mejor modelo fue aquel que obtuvo los valores más altos de las medidas de evaluación y fue el utilizado para generar los modelos considerando escenarios climáticos futuros.

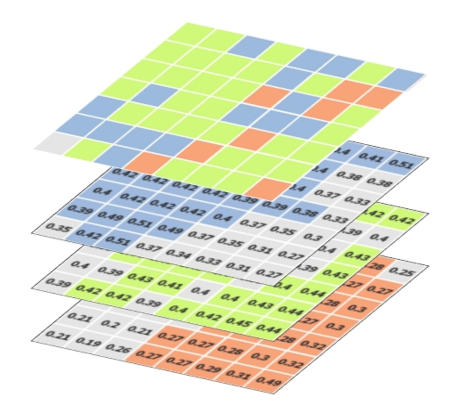


Figura 77. Esquema de la función de máxima probabilidad para tres categorías.

Desarrollo de modelos de distribución futura

Las condiciones climáticas futuras han sido estimadas mediante la aplicación de Modelos de Circulación General (General Circulation Models, GCM) combinados con escenarios de emisiones. Los GCMs son simulaciones numéricas que pretenden describir el sistema climático mediante condiciones atmosféricas, oceánicas y terrestres; y, los llamados escenarios de emisión estiman las emisiones de gases de efecto invernadero bajo diversas hipótesis sobre la variación futura de tres parámetros: población, energía y desarrollo (Fig. 14) (IPCC, 2000).

Específicamente, se utilizaron las condiciones climáticas definidas por el modelo HadCM3 bajo los escenarios A2 y B2 (Nakicenovic y Swart, 2000; Arnell et al., 2004). El escenario A2 muestra las mayores emisiones de gases efecto invernadero y describe un crecimiento poblacional alto y desarrollo económico y tecnológico lento. B2, algo más benigno, estima un crecimiento poblacional menor que A2 y un patrón sustentable de desarrollo ambiental, económico y tecnológico. Ambos escenarios tienen enfoque regional.

La distribución espacial futura de las formaciones vegetales se estimó mediante la proyección del mejor modelo, identificado en la etapa anterior, sobre la base de las

nuevas condiciones climáticas previstas para los años 2020, 2050 y 2080 (Fig. 15). En este caso, también se utilizaron los datos disponibles en la base climática de WorldClim.

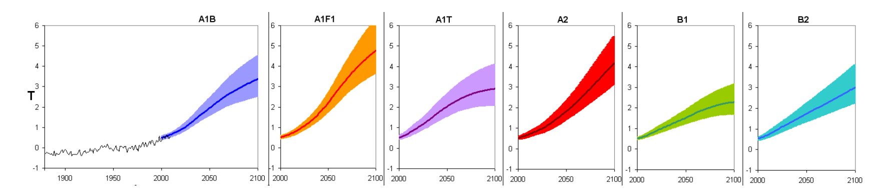


Figura 78. Estimaciones del incremento térmico hacia finales de siglo según varios escenarios de emisiones (tomado de http://climatesanity.wordpress.com/)

Al igual que en el caso de los modelos actuales, los resultados por formación vegetal fueron integrados en mapas consolidados siguiendo dos esquemas: dispersión nula y dispersión máxima ajustada. La dispersión nula asume que una formación vegetal ocupará sus óptimos climáticos futuros solamente si coinciden con su área actual de ocupación. Mientras que la dispersión máxima ajustada asume la ocupación de una formación en los sitios en donde su idoneidad climática ajustada sea mayor a la de las demás formaciones.

La dispersión máxima ajustada se basa en la comparación entre el mapa consolidado por dispersión máxima (obtenido con el mejor modelo para condiciones actuales) y la ocupación real de las formaciones vegetales. Se identifica la existencia de sitios (píxeles) que muestran un óptimo climático para una formación pero realmente están ocupados por otra. Esta diferencia entre ocupación ideal y ocupación real podría ser explicada, entre otras, por condiciones edafológicas, topográficas, microclimáticas o ecológicas (e.g. competencia entre especies, capacidad de dispersión). En este caso, se utilizó la inversa de la distancia más corta (medida sobre el terreno) a la potencial fuente de dispersión (zona de ocupación real) como el factor de ajuste de la idoneidad climática modelada. Este ajuste fue hecho por cada formación vegetal para su posterior integración en mapas consolidados.

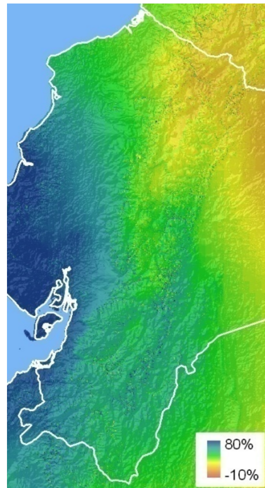


Figura 79. Modificaciones en la precipitación previstas para el año 2050, según el modelo HadCM3 y el escenario B2

El mapa consolidado por dispersión máxima ajustada, obtenido para las condiciones climáticas actuales, fue comparado con la distribución real actual mediante los índices Kappa mencionados en la sección anterior.

Los factores de ajuste para cada formación vegetal, calculados a partir del análisis de las condiciones actuales, fueron aplicados a los modelos de distribución futura, para su integración final en mapas consolidados para cada año y escenario de análisis.

Identificación de las modificaciones esperadas

Las modificaciones espaciales que sufrirían los ecosistemas se evaluaron mediante la comparación de su distribución futura modelada (dispersión nula y dispersión máxima ajustada) respecto a su distribución actual.

Se analizaron dos dimensiones de cambio: disponibilidad de hábitat y patrones de transición. La disponibilidad de hábitat, medida por la superficie de ocupación de cada formación, fue analizada utilizando los mapas tanto de dispersión nula como los de dispersión máxima ajustada. Mientras que los patrones de transición o cambio de ocupación entre formaciones fueron analizados mediante matrices de confusión (tabulación cruzada) creadas sobre la base del mapa de distribución actual y los mapas de dispersión máxima ajustada.



Foto: Christian Martínez

Resultados

Modelos de idoneidad

Se compararon los modelos de idoneidad generados con cuatro grupos de datos climáticos. A nivel de formación vegetal se usaron los estadísticos AUC y PSS (Tabla 2) mientras que los índices de similaridad Kappa (Tabla 3) se usaron para evaluar los resultados a nivel de mapas consolidados según los esquemas de dispersión máxima y nula.

Se obtuvieron valores altos de AUC para todos los modelos evaluados (AUC > 0,8) pero según el PSS los modelos para tres de las formaciones boscosas (de neblina montano y siempreverde montano alto y bajo) fueron regulares (PSS < 0,45). Según los índices Kappa, los mapas consolidados por dispersión nula presentaron resultados casi óptimos (valores > 0,9) a diferencia de los mapas por dispersión máxima cuyos resultados fueron regulares (valores entre 0,5 y 0,9).

Se observa que los estadísticos evaluados no toman valores muy distintos ente los cuatro grupos de variables analizados; sin embargo, el primer grupo presentó, de manera general, mejores resultados que los demás. Utilizando los modelos obtenidos con este grupo de variables se generó un mapa consolidado siguiendo el esquema de dispersión máxima ajustada para el que los índices de similaridad Kappa mostraron mejores resultados (valores > 0,8) que los obtenidos con el esquema de dispersión máxima (Tabla 4).

Tabla 28. Evaluación de modelos de idoneidad, a nivel de formación vegetal. Se comparan cuatro grupos de variables (G1 a G4) mediante los estadísticos AUC (*area under the ROC curve*) y PSS (*Peirce skill score*). Los mejores resultados por estadístico se muestran resaltados.

Formación vegetal	# muestras		AUC muestras entrenamiento				AUC muestras verificación				PSS			
	train	test	G1	G2	G3	G4	G1	G2	G3	G4	G1	G2	G3	G4
Bsdmb	3140	2093	0,967	**0,968**	0,958	0,964	**0,967**	0,966	0,957	0,964	**0,527**	0,525	0,524	0,519
Bsvp	5876	3917	**0,932**	0,929	0,890	0,916	**0,929**	0,927	0,887	0,914	**0,504**	0,495	0,403	0,459
Bsvmb	12829	8552	**0,848**	0,842	0,826	0,835	**0,848**	0,843	0,829	0,836	**0,410**	0,399	0,368	0,388
Bnm	8006	5336	**0,866**	0,862	0,843	0,843	**0,865**	0,859	0,845	0,843	**0,372**	0,369	0,343	0,344
Bsvma	4826	3216	**0,896**	0,889	0,862	0,870	**0,894**	0,888	0,864	0,871	**0,396**	0,390	0,359	0,368
Mh	1489	992	**0,937**	0,929	0,877	0,888	**0,927**	0,916	0,874	0,886	**0,452**	0,441	0,342	0,365
Ms	1934	1288	**0,967**	0,966	0,937	0,949	**0,965**	0,964	0,937	0,948	**0,556**	0,553	0,479	0,504
Pa	939	626	**0,983**	0,981	0,965	0,967	**0,979**	0,976	0,963	0,963	**0,582**	0,581	0,519	0,526
Ps	470	312	**0,992**	0,990	0,977	0,982	**0,991**	0,989	0,974	0,978	**0,630**	0,603	0,533	0,555
Pf	356	237	**0,996**	0,996	0,993	0,984	**0,995**	0,994	0,993	0,981	0,649	0,642	**0,686**	0,582
Ph	9456	6304	**0,889**	0,888	0,883	0,882	**0,889**	0,888	0,884	0,883	**0,459**	0,457	0,449	0,451
Sp	146	97	**0,997**	**0,997**	0,992	0,995	**0,997**	0,996	0,991	0,994	0,687	**0,707**	0,618	0,673

Tabla 29.Evaluación de modelos de idoneidad, generados con cuatro grupos de variables (G1 a G4), luego de integrarlos en mapas según los esquemas de dispersión máxima y nula. Mediante índices de similaridad, se comparan respecto al mapa de distribución actual. Se resaltan los mejores resultados.

Índice	Dispersión máxima				Dispersión nula			
	G1	G2	G3	G4	G1	G2	G3	G4
Kappa	**0,689**	0,663	0,528	0,571	**0,936**	0,927	0,918	0,933
Kno	**0,710**	0,685	0,554	0,597	**0,941**	0,933	0,924	0,939
KLocation	**0,786**	0,757	0,657	0,695	**1,000**	**1,000**	**1,000**	**1,000**
Kquantity	**0,877**	0,875	0,804	0,822	**0,936**	0,927	0,918	0,933
Fracción correcta	**0,734**	0,711	0,592	0,630	**0,945**	0,938	0,930	0,944

Tabla 30. Comparación de los mapas generados según los esquemas de dispersión máxima y máxima ajustada utilizando el grupo de variables G1. Se evalúa su similaridad respecto al mapa de distribución actual. Se resaltan los mejores resultados.

Esquema	*Kappa*	*Kno*	*Klocation*	*Kquantity*	Fracción correcta
Dispersión máxima	0,689	0,710	0,786	0,877	0,734
Dispersión máxima ajustada	**0,823**	**0,838**	**0,854**	**0,964**	**0,851**

Los modelos de idoneidad futuros fueron generados utilizando el primer grupo de variables según las condiciones climáticas estimadas por el modelo HadCM3 y dos escenarios de emisiones (A2 y B2) para los años 2020, 2050 y 2080.

La Tabla 5 compara, por cada formación vegetal, la superficie potencial según su óptimo climático, su superficie remanente y las estimaciones futuras.

Tabla 31. Superficies de idoneidad climática para cada formación vegetal. Se comparan la cobertura remanente y las estimaciones futuras (tres años y dos escenarios) respecto a la ocupación potencial.

Formación vegetal	Potencial (km^2)	Remanente (km^2)	Remanente (%)	Escenario A2 (%) 2020	Escenario A2 (%) 2050	Escenario A2 (%) 2080	Escenario B2 (%) 2020	Escenario B2 (%) 2050	Escenario B2 (%) 2080
Bsdmb	5723	4458	77,9	95,6	39,7	4,7	102,3	82,5	21,3
Bsvp	12400	8368	67,5	100,1	128,7	80,3	130,8	133,9	106,8
Bsvmb	23251	18345	78,9	110,5	114,2	109,8	92,8	95,1	106,8
Bnm	22421	11382	50,8	82,8	86,2	53,4	103,3	118,4	87,5
Bsvma	17416	6894	39,6	92,0	105,1	75,0	106,9	122,9	100,7
Mh	10803	2120	19,6	108,0	188,6	188,8	119,1	73,6	156,8
Ms	6893	2759	40,0	63,4	63,8	42,1	86,9	59,5	70,2
Pa	4955	1334	26,9	390,0	37,7	168,5	150,6	163,5	108,3
Ps	1860	666	35,8	3,6	0,2	0,0	46,9	60,8	0,0
Pf	1495	505	33,8	95,8	1116,5	2116,3	67,2	78,7	1999,1
Ph	18864	13496	71,5	79,6	48,4	24,6	86,7	76,8	45,3
Sp	1211	207	17,1	14,9	4,8	0,0	41,3	18,8	2,1

Todas las formaciones ocupan actualmente una fracción de su óptimo climático, siendo el matorral húmedo, el páramo arbustivo y el superpáramo los más restringidos, con superficies remanentes menores al 30% del área potencial. Mientras que, formaciones como el páramo herbáceo o los bosques semideciduo y siempreverde montano bajo se muestran mejor distribuidos, ocupando más del 70% de su zona potencial.

Para el caso de las estimaciones futuras, se evidencia que el modelo A2 es más crítico que el B2. Se identifican panoramas muy desalentadores para el páramo seco y el superpáramo ya que hacia el 2080 sus áreas idóneas desaparecerían completamente. Formaciones como el páramo herbáceo y el bosque semideciduo montano bajo habrán perdido más del 50% de su área potencial para mediados de este siglo. Mientras que para los bosques siempreverde y el matorral húmedo las pérdidas no serían mayores del 20% e incluso su distribución potencial, en algunos períodos, podría ser mayor a la actual. El páramo de frailejones se muestra como

un caso especial ya que hacia finales de siglo su área potencial se habría incrementado 20 veces.

La integración de estos resultados se muestra en mapas consolidados según los esquemas de dispersión nula y máxima ajustada (Fig. 16). Estos resultados son aproximaciones de la distribución espacial de las formaciones vegetales bajo las condiciones previstas de cambio climático.

Modificación espacial

Disponibilidad de hábitat

Los mapas que integran los resultados de los modelos de idoneidad muestran, de manera general, que el cambio climático ocasionará una disminución permanente del hábitat adecuado para las formaciones vegetales analizadas. La Figura 17 presenta las tendencias de esta disminución y la Tabla 6 resume la superficie de ocupación para cada formación vegetal según los escenarios analizados.

Nuevamente se verifica lo crítico que sería el escenario A2 ya que, considerando una capacidad de dispersión nula, para finales de siglo se espera una pérdida del 70% de los remanentes actuales. Sin embargo, según el esquema de dispersión máxima ajustada la pérdida sería únicamente del 23%. El escenario B2, algo más conservador, estima pérdidas del 52% para la dispersión nula y del 13% para la máxima ajustada. Además, la tasa de pérdida se incrementaría fuertemente en la segunda mitad de siglo. Mientras que para esta próxima década se esperaría que los cambios afecten entre el 2% (B2, dispersión máxima ajustada) y el 19% (A2, dispersión nula) de los remanentes actuales.

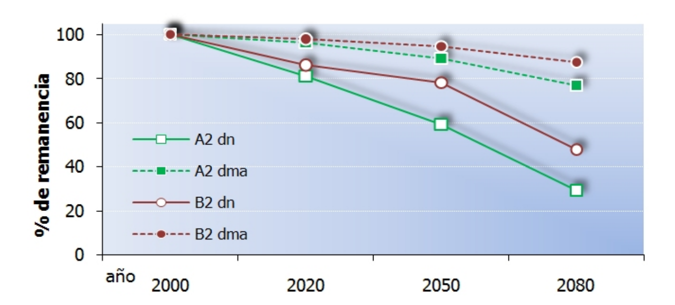


Figura 80. Tendencia de la pérdida de remanencia (% respecto a la cobertura actual), considerando los escenarios A2 y B2, para tres años, y los esquemas de dispersión nula (dn) y máxima ajustada (dma).

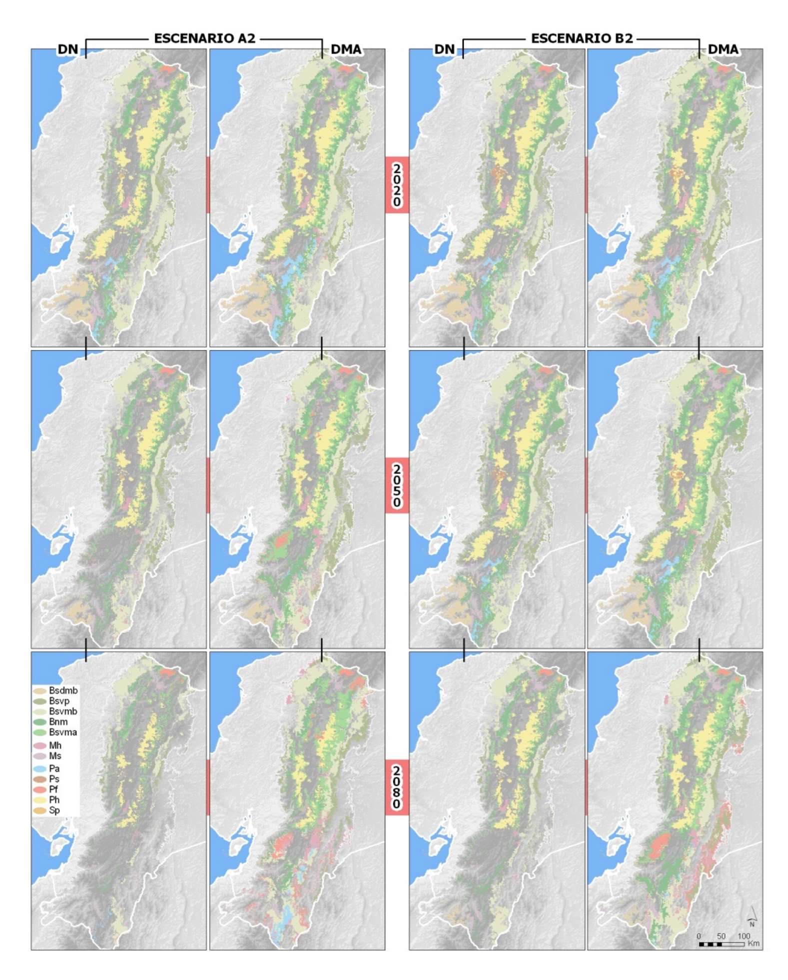


Figura 81. Distribución de las formaciones vegetales estimada para los años 2020, 2050 y 2080; según losescenarios A2 y B2 y los esquemas de dispersión nula (DN) y máxima ajustada (DMA).

Tabla 32. Superficie de ocupación futura (2020, 2050 y 2080) para cada formación vegetal, estimada según los escenarios de emisiones A2 y B2 y los esquemas de dispersión nula y máxima ajustada.

Formaciones vegetales	Remanente (km^2)	Escenario A2 (km^2)						Escenario B2 (km^2)					
		d. nula			d. máxima ajustada			d. nula			d. máxima ajustada		
		2020	2050	2080	2020	2050	2080	2020	2050	2080	2020	2050	2080
Bsdmb	4458	3902	1485	33	4438	1766	245	4029	2991	696	4413	3587	937
Bsvp	8368	7112	5196	1326	7616	8763	5597	7821	6981	2655	10172	10590	6915
Bsvmb	18345	17119	13700	7513	20233	18622	15875	15560	13856	10625	16799	15481	16623
Bnm	11382	7453	5751	2180	9425	10104	5115	9395	9591	5369	11280	12341	9834
Bsvma	6894	5012	4497	3197	6884	9165	9154	5718	5594	4276	7844	9223	8587
bosques	*49447*	*40597*	*30629*	*14249*	*48596*	*48420*	*35985*	*42522*	*39012*	*23621*	*50508*	*51223*	*42895*
Mh	2120	1120	1316	618	1649	3166	5752	1292	787	882	1747	1095	4295
Ms	2759	1889	1324	980	2500	2031	1709	2238	1560	1292	2799	2051	2360
matorrales	*4879*	*3009*	*2640*	*1597*	*4150*	*5197*	*7461*	*3530*	*2347*	*2173*	*4547*	*3145*	*6655*
Pa	1334	1329	104	274	3091	180	2126	1260	1255	43	1921	1343	467
Ps	666	2	3	0	2	2	0	475	388	0	369	342	0
Pf	505	486	500	505	510	1541	4350	475	437	475	425	342	4392
Ph	13496	11821	7701	3905	11415	7460	4417	12408	11523	7298	11272	10215	7204
Sp	207	73	47	0	88	48	0	132	79	25	125	88	21
páramos	*16209*	*13711*	*8354*	*4685*	*15106*	*9231*	*10893*	*14750*	*13683*	*7841*	*14112*	*12331*	*12084*
total	*70535*	*57317*	*41623*	*20531*	*67851*	*62848*	*54339*	*60803*	*55042*	*33635*	*69167*	*66699*	*61635*

De entre los bosques, el más afectado sería el semideciduo montano bajo ya que todos los escenarios coinciden en que para finales de siglo habría perdido más del 80% de su superficie. Por otra parte, el bosque siempreverde montano alto se vería beneficiado por el cambio climático ya que según los escenarios de dispersión máxima ajustada incrementaría su ocupación al 130%. A nivel general, los próximos diez años no estarían caracterizados por pérdidas muy altas (< 15%); sin embargo, hacia mediados de siglo se esperan pérdidas de hasta el 50%.

Para los matorrales, el seco muestra una tendencia permanente de pérdida de su hábitat llegando a mantener únicamente el 35% de su cobertura actual hacia el año 2080, según el escenario más crítico. En el caso del matorral húmedo los patrones son más variables, las pérdidas registradas para casi todos los períodos serían mayores a las del matorral seco pero, según los escenarios de dispersión máxima ajustada, en la segunda mitad de siglo su hábitat se incrementaría llegando a duplicar su cobertura actual.

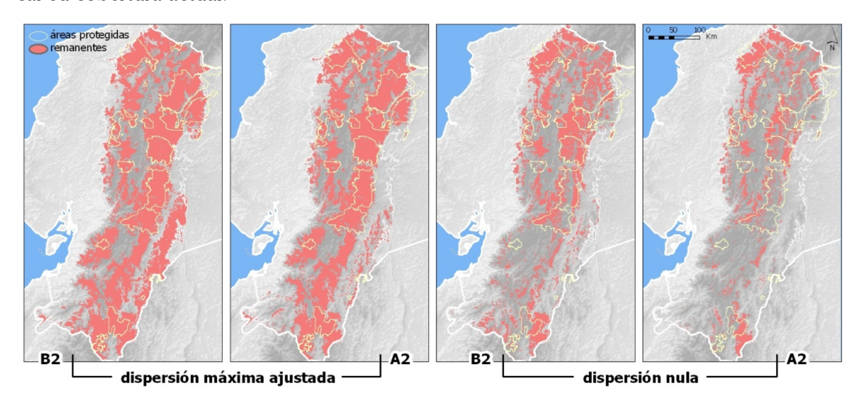


Figura 82. Patrón de avance de los efectos del cambio climático mediante la comparación de las zonas remanentes estimadas hacia el año 2080, según los escenarios A2 y B2 y los esquemas de dispersión nula y máxima ajustada.

En el caso de los páramos, el impacto más grave lo registra el páramo seco ya que prácticamente desaparecería en los próximos diez años (según el escenario A2). Igualmente, el superpáramo perdería más de la mitad de su cobertura actual en esta década y desaparecería a finales de siglo. Para el páramo herbáceo, el más dominante, se registra una pérdida constante llegando a mantener únicamente el 30% de su cobertura actual hacia el año 2080. Contrario a los patrones generales, el páramo de frailejones se muestra como el más estable, ya que no registrará pérdidas mayores al 10% durante este siglo; e incluso, considerando el esquema de dispersión máxima, llegaría a ocupar extensiones hasta ocho veces mayores que la actual.

La pérdida de hábitat muestra patrones de avance altitudinales y latitudinales y su alcance dependerá de la severidad del cambio climático (ver Fig. 16). En efecto, al observar los resultados para todos los modelos resalta la existencia de un patrón de desplazamiento de los efectos, lo que se traduce en los cambios de los óptimos climáticos de las formaciones vegetales. Asimismo, la comparación de las estimaciones de las zonas remanentes hechas para el año 2080 resume, de alguna manera, este desplazamiento (Fig. 18). Los primeros efectos se sentirían en la zona sur, principalmente en los remanentes de bosque semideciduo montano bajo de las provincias de Loja y El Oro. Posteriormente, el cambio avanzaría por los flancos orientales de la cordillera afectando zonas de bosques siempreverde piemontano y montano bajo llegando a comprometer remanentes del Parque Nacional Sumaco Napo Galeras. Luego, las modificaciones climáticas avanzarían por los flancos occidentales y la Sierra Centro Sur donde existen remanentes de matorrales y páramos dentro de los Parques Nacionales Podocarpus, Cajas y Sangay. Los cambios seguirían hacia el Norte afectando a casi la totalidad de la cordillera oriental. A su vez, en la zona noroccidental (provincias de Esmeraldas, Carchi e Imbabura) se observan remanentes de bosque siempreverde montano bajo, matorral seco y páramo de frailejones que no presentan cambios notables. Sin embargo, se esperaría que análisis con horizontes temporales más extensos mostraran modificaciones en toda la región.



Foto: Gioconda Remache

Patrones de transición

Las predicciones de cambio climático ocasionarían una reorganización espacial de las formaciones vegetales asumiendo que estas tuviesen cierta capacidad de dispersión. Los patrones de ocupación serían variables dependiendo del período de análisis. La dinámica se concentraría en los bosques para los que la superficie ganada iguala o supera las pérdidas. Mientras que, a largo plazo, los matorrales ganarían mucha superficie y los páramos se verían más restringidos.

La Figura 19 muestra, para cada formación, su ocupación actual y la estimada a finales de siglo permitiendo visualizar patrones espaciales de desplazamiento. De manera general, se observan desplazamientos altitudinales y restricciones latitudinales, ocasionando una fuerte dinámica de cambio y transiciones entre formaciones. La Figura 20 indica las variaciones altitudinales esperadas a lo largo de los

períodos de análisis y la Tabla 7 resume la superficie de transición entre formaciones al año 2080 bajo el escenario A2. Por cada formación vegetal, se reconocen los siguientes patrones de transición.

El bosque semideciduo montano bajo presentaría una reducción permanente de su zona núcleo, relegándose a su porción más austral, con una pequeña franja de avance sobre actuales zonas de contacto con bosque siempreverde piemontano, de neblina montano y matorral seco.

El bosque siempreverde piemontano mostraría inicialmente una reducción de su zona núcleo, luego avanzaría altitudinalmente perdiendo mucha de su representatividad en las estribaciones occidentales de la cordillera y ocuparía principalmente zonas del actual bosque siempreverde montano bajo.

El bosque siempreverde montano bajo avanza ganando zonas más altas y perdiendo las laderas más bajas. En esta transición, ocuparía zonas de actuales bosques de neblina montano y matorral húmedo. El patrón de avance le permitiría alcanzar la Sierra Central llegando a ocupar algunas regiones de las estribaciones sur occidentales cercanas a Loja y Cuenca.

El bosque de neblina montano ocupa actualmente una franja muy delgada que se haría más angosta. Avanzaría altitudinalmente pero no ocuparía zonas continuas o agregadas. Perdería representatividad en la Sierra Sur y prácticamente desaparecería de las estribaciones de la cordillera oriental donde actualmente se encuentra protegido por la Reserva Ecológica Antisana y los Parques Nacionales Sumaco Napo Galeras y Llanganates. Lograría ganar zonas de bosque siempreverde montano alto, matorral húmedo, matorral seco, páramo arbustivo y páramo herbáceo.

El bosque siempreverde montano alto avanzaría altitudinalmente y ganaría superficie reduciendo su actual fragmentación, sin embargo perdería representatividad hacia la zona austral restringiéndose latitudinalmente. Su mayor zona de ganancia estaría en la cordillera oriental al interior de las Reservas Ecológicas Cayambe Coca y Antisana. Ocuparía actuales zonas de páramo herbáceo y en menor proporción de bosque de neblina montano y matorral húmedo.

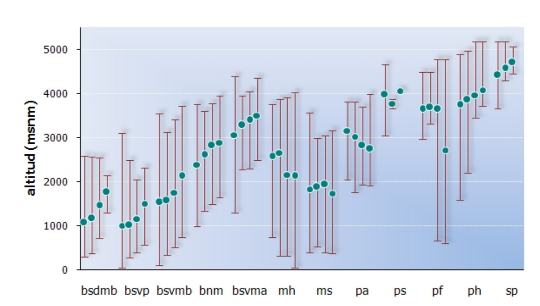
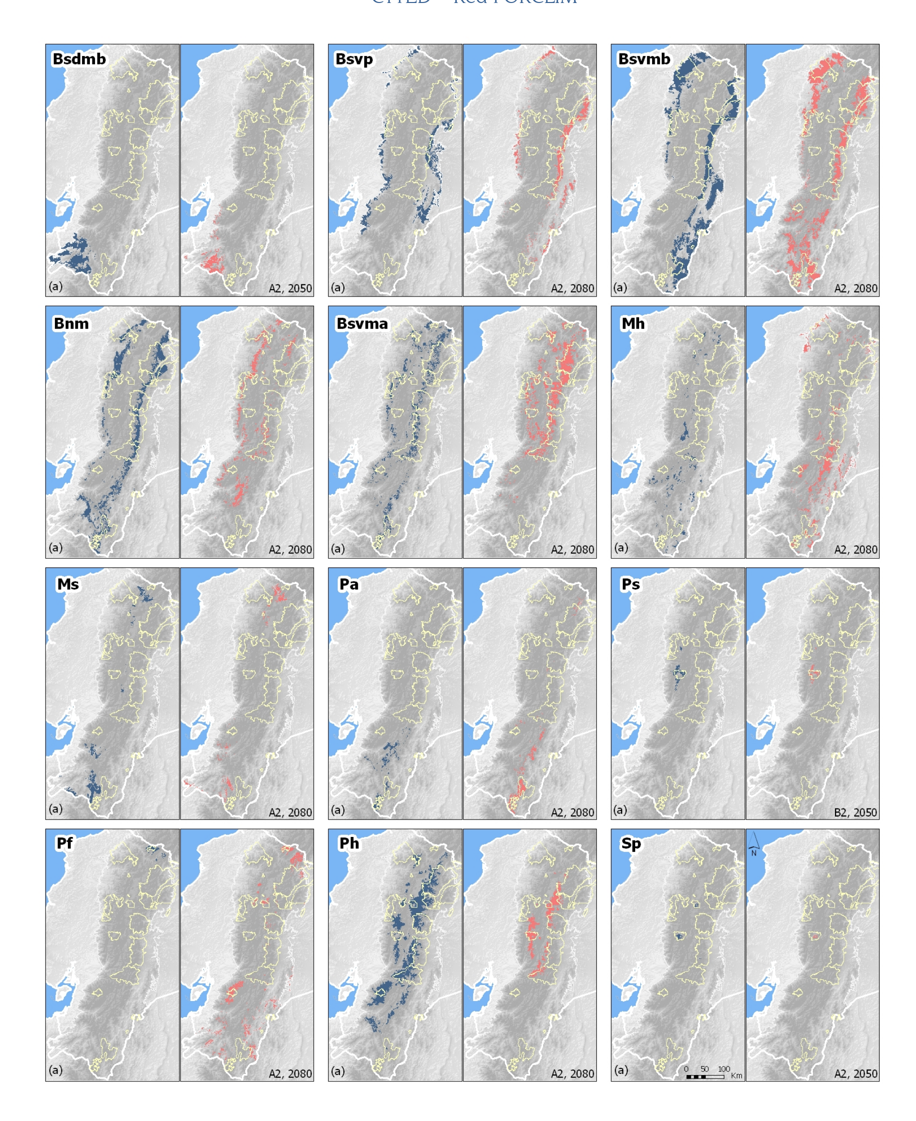


Figura 83. Variaciones altitudinales esperadas por formación vegetal (escenario A2 y dispersión máxima ajustada). Para cada año (actual, 2020, 2050 y 2080) se muestran los valores medios (puntos), máximos y mínimos (barras).



Bsdmb
(a)
A2, 2050
Bsvp
(a)
A2, 2080
Bsvmb
(a)
A2, 2080
Bnm
(a)
A2, 2080
Bsvma
(a)
A2, 2080
Mh
(a)
A2, 2080
Ms
(a)
A2, 2080
Pa
(a)
A2, 2080
Ps
(a)
B2, 2050
Pf
(a)
A2, 2080
Ph
(a)
A2, 2080
Sp
(a)
0 50 100 Km
N
A2, 2050

Tabla 33. Superficies de transición (km²) entre la distribución actual y la esperada hacia el año 2080, según el escenario A2 y el esquema de dispersión máxima ajustada. La categoría nd incluye aquellas zonas que no mostraron idoneidad climática futura para ninguna de las formaciones vegetales analizadas.

	Formación vegetal	2080													
		Bsdmb	**Bsvp**	**Bvsmb**	**Bnm**	**Bsvma**	**Mh**	**Ms**	**Pa**	**Ps**	**Pf**	**Ph**	**Sp**	**nd**	***total***
	Bsdmb	33	-	60	3	-	1	345	-	-	376	-	-	3640	*4458*
	Bsvp	168	1303	183	79	-	1217	10	-	-	333	-	-	5076	*8368*
	Bvsmb	3	3944	7205	37	1	1228	-	6	-	767	-	-	5155	*18345*
	Bnm	18	290	5090	2020	653	1028	187	953	-	310	-	-	833	*11382*
	Bsvma	3	14	922	1227	3017	497	79	714	-	277	11	-	134	*6894*
	Mh	5	47	210	286	302	595	89	45	-	107	-	-	434	*2120*
actual	**Ms**	14	-	753	97	26	55	973	49	-	52	-	-	739	*2759*
	Pa	-	-	418	383	30	210	1	259	-	22	-	-	11	*1334*
	Ps	-	-	-	23	211	-	-	-	-	-	426	-	6	*666*
	Pf	-	-	-	-	25	-	-	-	-	480	-	-	-	*505*
	Ph	-	-	1034	959	4889	923	25	100	-	1625	3775	-	166	*13496*
	Sp	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	205	-	-	*207*
	total	*245*	*5597*	*15875*	*5115*	*9154*	*5752*	*1709*	*2126*	*0*	*4350*	*4417*	*0*	*16195*	*70535*

El matorral húmedo se expandiría ampliamente ganando espacio en las estribaciones sur orientales y nor occidentales. Ocuparía actuales zonas de bosques siempreverde, de neblina montano, páramo herbáceo y matorral seco.

El matorral seco sufriría una constante disminución de su área núcleo y solamente lograría ganar una pequeña franja, al extremo sur occidental, actualmente ocupada por bosque semideciduo montano bajo y pequeñas fracciones de bosque de neblina montano.

El páramo arbustivo presentaría una consolidación en zonas más bajas y hacia el sur, ocupando principalmente remanentes de bosques de neblina montano y siempreverde montano alto dentro del Parque Nacional Podocarpus.

El páramo seco no dispondría de zonas climáticamente idóneas y desaparecería.

El páramo de frailejones llegaría a expandirse ampliamente avanzando hacia el sur y ocupando zonas más bajas. Reemplazaría principalmente al páramo herbáceo y a bosques siempreverde montanos y aparecería dentro de los Parques Nacionales Cotopaxi y Cajas.

El páramo herbáceo perdería periódicamente sus actuales bordes, viéndose reducido a las zonas más elevadas y su distribución se restringiría a la Sierra Centro Norte, principalmente en los alrededores de los volcanes Chimborazo y Cotopaxi. Reemplazaría principalmente al páramo seco y al superpáramo. El superpáramo, al igual que el páramo seco, desaparecería.

Es evidente que, a pesar de utilizar un esquema de dispersión, casi la cuarta parte de la zona de estudio (23%) no presentaría condiciones climáticas favorables para ninguna de las formaciones analizadas. Estas zonas se concentran en las estribaciones orientales y occidentales lo que hace suponer que serían ocupadas por actuales formaciones de tierras bajas.



Foto: Christian Martínez

Discusión

La aplicación de modelos de idoneidad ha sido ampliamente difundida para la evaluación de los impactos del cambio climático en la distribución espacial de la flora y la fauna (e.g. Iverson y Prasad, 1998; Bakkenes, 2002; Parra et al., 2004). En Ecuador, la mayoría de investigaciones se han realizado a nivel de especie (e.g. Cuesta-Camacho et al., 2006; Delgado, 2008) principalmente, para captar las respuestas individuales de las mismas (Guisan y Zimmermann, 2000) y evaluar patrones de variabilidad de riqueza y diversidad. Otras aproximaciones a nivel de ecosistemas (e.g. Cuesta et al., 2009) evalúan cambios en sus nichos bioclimáticos pero de manera independiente. En este trabajo se desarrolló una aproximación a nivel de paisaje al integrar los modelos de idoneidad de las formaciones vegetales presentes en los Andes de Ecuador.

La vulnerabilidad de los ecosistemas de montaña ante los efectos del cambio climático ha sido resaltada en varios trabajos (Sala et al., 2000; IPCC, 2007) y confirmada con esta evaluación. Los escenarios analizados muestran modificaciones de las zonas climáticamente idóneas para las formaciones vegetales, definiendo zonas de pérdida, ganancia o estabilidad. Los patrones de cambio se muestran más evidentes al integrar esos resultados en mapas donde se asigna una sola categoría a cada localidad (píxel). Formaciones vegetales poco representativas (ocupación actual reducida) o de distribución restringida (e.g. bosque semideciduo montano bajo, páramo seco y superpáramo) son las más vulnerables y potencialmente llegarían a desaparecer. También, se observan patrones de desplazamiento altitudinal y latitudinal poniendo en evidente riesgo, principalmente, a los páramos. Estas tendencias concuerdan con las observadas a nivel de especies (Delgado, 2008) donde se reportan altas tasas de recambio en la zona altoandina con patrones de desplazamiento altitudinales y latitudinales.



Foto: Christian Martínez

En cuanto a transformaciones de paisaje, se puede decir que el proceso dominante será la fragmentación, caracterizada por el incremento del número de parches y la reducción del área de ocupación (Fig. 21); mostrándose con mayor intensidad en bosques y páramos. A su vez, los matorrales muestran patrones variables que, además de fragmentación, presentarían pérdida de área y disminución del número de parches o incremento del número de parches y del área de ocupación. Este panorama estaría dominado únicamente por las condiciones climáticas y bajo el supuesto de homogeneidad al interior de las formaciones vegetales. Sin embargo, la distribución espacial de los organismos vivos no depende solamente del clima sino también de la disponibilidad de recursos como cantidad de luz, agua y nutrientes (Austin, 2002). Además, la ocupación de nuevos sitios dependerá de la capacidad de dispersión y la presencia de barreras de migración (Malcolm et al., 2002; Pearson, 2006) así como de condiciones específicas de adaptabilidad (Dudley, 1996) y competencia (Weigelt y Jolliffe, 2003). El esquema se vuelve más complejo si consideramos que los actuales remanentes de vegetación presentan gradientes en cuanto a su integridad ecológica (Encalada y Martínez, 2005) lo que podría disminuir su capacidad de enfrentar las condiciones cambiantes de clima volviendo aún más dramáticas las futuras modificaciones.

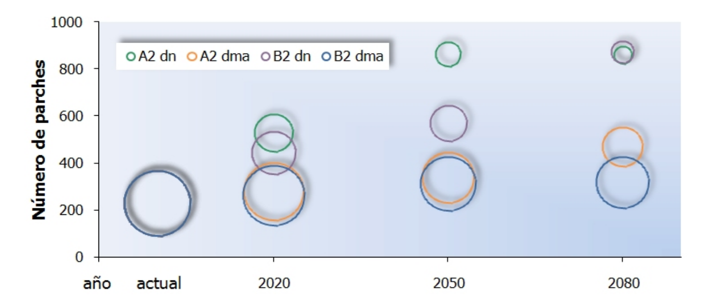


Figura 85. Variación temporal del número de parches (eje Y) y su tamaño promedio (proporcional área de los círculos) para los remanentes naturales.

Estas estimaciones consideraron dos escenarios climáticos (A2 y B2) y dos esquemas de dispersión (nula y máxima ajustada). La comparación de los resultados para cada fecha de análisis (años 2020, 2050 y 2080) muestra gran variabilidad, identificándose cuatro fuentes potenciales de incertidumbre: el sesgo espacial de los registros de presencia, la definición del punto de corte, los esquemas de dispersión y los escenarios climáticos.

Si bien en este trabajo se partió de la premisa de que la representatividad actual de las formaciones vegetales era suficiente para caracterizar su nicho climático, el análisis de los modelos para el páramo de frailejones pone en evidencia ciertos patrones inesperados. Todos los modelos futuros muestran que dicha formación

incrementará su óptimo climático exageradamente, lo que objetivamente no sería de esperar, ya que es una formación con requerimientos ambientales muy específicos. Considerando que, respecto a su distribución total, tiene muy poca presencia en Ecuador, cabe pensar que su óptima caracterización requería considerar registros de presencia en una zona mucho más amplia para captar toda su variabilidad climática y evitar los sesgos obtenidos.


Foto: Christian Martínez

Se ha determinado que los modelos de idoneidad son sensibles a la medida estadística que define los límites de distribución (zonas de presencia y ausencia) del organismo modelado (Thuiller, 2004; Liu et al., 2005). El punto de corte definirá la magnitud de los errores de omisión y comisión (Lobo et al., 2008) y la tolerancia de estos errores dependerá de los objetivos de cada investigación. En este caso se utilizó el punto de corte que maximiza la suma de la sensibilidad y la especificidad de los puntos de entrenamiento, minimizando los errores de omisión y comisión (Manel et al., 2001). La selección de este umbral ha mostrado buen desempeño en evaluaciones comparativas (Liu et al., 2005) y también en este estudio se muestra adecuado para representar la distribución actualmente observada, lo que justifica su uso para los modelos futuros. Sin embargo, debe aclararse que los resultados variarían si se seleccionara otro punto de corte.


Foto: Christian Martínez

La capacidad de dispersión será un factor importante en la respuesta de la flora ante el cambio climático (Leemans y van Vliet, 2005; Kazakis et al., 2006; Thuiller et al., 2008). Algunos estudios incluyen simulaciones de dispersión (e.g. Thuiller, 2003; Thomas et al., 2004; Broennimann et al., 2006; Engler y Guisan, 2009) pero el conocimiento limitado que existe sobre dinámicas ecológicas específicas limita su aplicación, lo que se traduce en un uso tradicional de supuestos de dispersión nula e ilimitada (e.g. Thomas et al, 2004; Thuiller, 2004; Thuiller et al., 2005, Ohlermüller et al., 2006), que abarcan las posibilidades extremas de respuesta. Para este estudio se utilizaron dos esquemas de dispersión (nula y máxima ajustada) que fueron generalizados, dejando de lado la evidente diversidad en el interior de cada formación vegetal (Sierra, 1999). La dispersión nula presenta solamente la posibilidad de pérdida de hábitat, mientras que la máxima ajustada asume mayor capaci-

dad de ocupar óptimos climáticos si éstos son cercanos a la zona de ocupación actual. A pesar de ser una aproximación subjetiva, este ajuste permitió mejorar los resultados obtenidos bajo el esquema de dispersión máxima o ilimitada. Otra opción hubiese sido incluir una variable asociada a la dispersión (e.g. distancia a fuentes de semillas, superficie de fricción limitante) directamente en el grupo original de variables independientes.

Los escenarios de cambio climático dependen de la variación futura que muestren los parámetros de población, energía y desarrollo (IPCC, 2000), que al ser muy inestables generan diversas hipótesis de combinación. Este estudio usó las previsiones del modelo HadCM3 según los escenarios A2 y B2 utilizadas también en otras evaluaciones (Cuesta-Camacho et al., 2006; Delgado, 2008) con el fin de que los resultados sean comparables. Además, la combinación con los esquemas de dispersión y la proyección a tres fechas facilita la visualización de los patrones espaciales y temporales de cambio. Los efectos más graves se obtienen bajo los supuestos del escenario A2, lo que coincide con otras evaluaciones (IPCC, 2000; Nakicenovic et al., 2000). Pero, si bien es cierto que el escenario B2 se muestra más benigno, sus estimaciones son similares a las obtenidas bajo el A2 pero con un retraso temporal, es decir que los cambios esperados a finales de siglo bajo el escenario B2 serían equivalentes a los esperados a mediados de siglo bajo el A2.

La combinación de los escenarios climáticos y los esquemas de dispersión incrementa la variabilidad de los resultados pero a la vez permite identificar sitios de menor incertidumbre (donde coinciden varios modelos). Por ejemplo, aquellas zonas donde las formaciones vegetales actuales se estimen estables deberán ser de interés para la conservación con el fin de mantener actuales características de esos ecosistemas y a la vez garantizar potenciales fuentes de semillas. Sin embargo, sería necesario evaluar su grado de integridad ecológica y analizar la posible ejecución de programas de recuperación y restauración. Además, Delgado (2008) identificó a los flancos de la cordillera como zonas de refugio de la riqueza vegetal por lo que las acciones de manejo también deberían encaminarse al diseño de


Foto: Christian Martínez

corredores de conectividad vertical entre los ecosistemas altoandinos, montanos y de tierras bajas. Por otro lado, aquellos sitios que coincidan como no adecuados para ninguna de las formaciones deberán priorizarse para la investigación y el manejo especial por ser potenciales sitios de modificaciones ecológicas (Bakkenes et al., 2002; Thuiller, 2004; Thuiller et al., 2005; Broennimann et al., 2006) como cambios en la composición de especies y el desarrollo de nuevas interacciones ecológicas o de mecanismos de adaptación.

Los impactos más graves del cambio climático serán consecuencia de la interacción entre amenazas (Thomas et al., 2004) y, a pesar de que este estudio estuvo restringido a las actuales zonas remanentes, se conoce que las modificaciones de los paisajes están relacionadas principalmente con actividades antrópicas (Kasperson et al., 1995; Vitousek,et al., 1997). La zona andina de Ecuador se ha caracterizado por una fuerte dinámica de cambio de uso de suelo (López, 2009; Martínez, 2009) asociada principalmente a los sistemas de producción. Estos sistemas también se verán afectados por el cambio climático (INIA, 2009) y previsiblemente intensificarán el avance de la frontera agrícola incrementando las presiones sobre los remanentes naturales. La integración de las dimensiones natural y humana es una necesidad para planificar adecuadamente el uso del territorio buscando alternativas equilibradas entre las actividades productivas y las acciones de conservación en el marco de los escenarios de cambio climático. Se presenta entonces un panorama de grandes retos para la investigación y la gestión territorial.



Foto: Christian Martínez

Referencias citadas

ARNELL NW LIVERMORE MJL KOVATS S LEVY PE NICHOLLS R PARRY ML GAFFIN SR (2004) Climate and Socio-economic scenarios for global-scale climate change impacts assessments: characterizing the SRES storylines. Global Environmental Change 14: 3-20.

AUSTIN MP (2002) Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. Ecological Modelling 157: 101–118.

AUSTIN M (2007) Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches. Ecological Modelling 200: 1-19.

BAKKENES M, ALKEMADE JRM, IHLE F, LEEMANS R, LATOUR JB (2002) Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. Global Change Biology 8: 390-407.

BAQUERO F, SIERRA R, ORDÓÑEZ L, TIPÁN M, ESPINOSA L, RIVERA MB, SORIA P (2004) La Vegetación de los Andes del Ecuador Memoria explicativa de los mapas de vegetación: potencial y remanente a escala 1:250000 y del modelamiento predictivo con especies indicadoras. EcoCiencia/CESLA/Corporación EcoPar/MAG SIGAGRO/CDC - Jatun Sacha/División Geográfica - IGM Quito.

BENISTON M, DIAZ HF, BRADLEY RS (1997) Climatic Change at High Elevation Sites: An Overview. Climatic Change 36: 233-251.

BROENNIMANN O, THUILLER W, HUGHES G, MIDGLEY G, ALKEMADE R, GUISAN A (2006) Do geographic distribution niche property and life form explain plants' vulnerability to global change? Global Change Biology 12:1079-1093.

BUERMANN W, SAATCHI S, SMITH T, ZUTTA B, CHAVES J, MILÁ B, GRAHAM C (2008) Predicting species distributions across the Amazonian and Andean regions using remote sensing data. Journal of Biogeography 35:1160-1176.

CANTOR SB, SUN CC, TORTOLERO-LUNA G, RICHARDS-KORTUM R, FOLLEN MA (1999) A comparison of C/B ratios from studies using receiver operating characteristic curve analysis. Journal of Clinical Epidemiology 52: 885e92.

CARSTENSEN LW (1987) A measure of similarity for cellular maps, The American Cartographer 14(4): 345-358.

CHAPIN FSIII, ZAVALETA ES, EVINER VT, NAYLOR RL, VITOUSEK PM, REYNOLDS HL, HOOPER DU, LAVOREL S, SALA OE, HOBBIE SE, MACK MC, DÍAZ S (2000) Consequences of changing biodiversity. Nature 405:234-242.

CUESTA-CAMACHO F, GANZENMÜLLER A, PERALVO MF, SÁENZ M, NOVOA J, RIOFRÍO G (2006) Predicting specie's niche distribution shifts and biodiversity change within climate change scenarios. A regional assessment for bird and plant species in the Northern Tropical Andes. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM-NEAA) EcoCiencia/MNP_Andes, 1-36.

CUESTA F, PERALVO M, VALAREZO N (2009) Los bosques montanos de los Andes Tropicales Una evaluación regional de su estado de conservación y de su vulnerabilidad a efectos

del cambio climático. Serie Investigación y Sistematización, 5. Programa regional ECOBONA – INTERCOOPERACIÓN, Quito.

DE PANDO BB, PEÑAS DE GILES J (2007) Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica. GeoFocus 7: 100-119.

DELGADO T (2008) Evolución de la diversidad vegetal en el Ecuador ante un escenario de cambio global. Universidad Complutense de Madrid Memoria de Tesis Doctoral.

DUDLEY SA (1996) The response to differing selection on plant physiological traits: evidence for local adaptation. Evolution 50: 103-110.

EASTMAN JR, VAN FOSSEN ME, SOLÓRZANO LA (2005) Transition potential modeling for land-cover change. En: Maguire DJ, Baty M, Goodchild MF (Eds) GIS Spatial Analysis and Modeling. ESRI, Redlands-California.

ENCALADA A, MARTÍNEZ C (2005) Evaluación Ecológica de Paisaje de la Provincia de Cotopaxi. Programa CBP EcoCiencia/HCPC, Quito.

ENGLER R, GUISAN A (2009) MigClim: Predicting plant distribution and dispersal in a changing climate. Diversity and Distributions 15: 590-601.

GUISAN A, THUILLER W (2005) Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. Ecology Letters 8: 993-1009.

GUISAN A, ZIMMERMANN N (2000) Predictive habitat distribution models in ecology. Ecological Modelling, 135: 147-186.

HIJMANS RJ, CAMERON SE, PARRA JL, JONES PG, JARVIS A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 25: 1965-1978.

HOBBS RJ, ARCO S, ARONSO J, BARON JS, BRIDGEWATER P, CRAMER VA, EPSTEIN PR, EWEL JJ, KLINK CA, LUGO AE, NORTON D, OJIMA D, RICHARDSON DM, SANDERSON EW, VALLADARES F, VILÀ M, ZAMORA R, ZOBEL M (2006) Novel ecosystems: theoretical and management aspects of the new ecological world order. Global Ecology and Biogeography 15: 1-7.

HOFSTEDE R, LIPS J, JONGSMA W, SEVINK J (1998) Geografía Ecología y Forestación de la Sierra alta del Ecuador. Revisión de Literatura, EcoPar/Abya Yala, Quito.

HOLT RD (1990) The microevolutionary consequences of climate change. Trends in Ecology and Evolution, 5: 311-315.

HUGHES L (2000) Biological consequences of global warming: is the signal already. Tree 15: 56-61.

HULME M, SERRAD N (1999) Escenarios de Cambio Climático para Países de los Andes del Norte. Unidad de Investigación Climática, Reino Unido.

HUNTLEY B, BERRY PM, CRAMER W, MCDONALD AP (1995) Modelling present and potential future ranges of some European higher plants using climate response. Journal of Biogeography, 22: 967-1001.

IGAC (2010) Manual de Procedimientos, Investigación, Desarrollo e Innovación. Grupo Interno de Trabajo Gestión del Conocimiento en Tecnologías Geoespaciales, 23 p.

INIA (2009) Vulnerabilidad al cambio climático en los sistemas de producción agrícola en América Latina y el Caribe: Desarrollo de respuestas y estrategias. INIA, The World Bank, Cornell University.

IPCC (2001) Tercer Informe de Evaluación Cambio Climático (2001): Impactos adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas y Resumen Técnico. Grupo de Trabajo II.

IPCC (2002) Cambio climático y biodiversidad Documento técnico V del IPCC

IPCC (2007) Climate Change (2007): Climate Change Impacts Adaptation and Vulnerability Summary for Policymakers Working. Group II Contribution to the Intergovernmental panel on Climate Change. Fourth Assessmente Report.

IPCC-TGCIA (2006) Climate Change (2001): Impacts Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: 75-105. Cambridge University Press, Cambridge.

IVERSON LR, PRASAD AM (1998) Predicting Abundance of 80 Tree Species Following Climate Change in the Eastern United States Ecological Monographs 68:465-485

JØRGENSEN P, LEÓN S (Eds) (1999) Catalogue of the Vascular Plants of Ecuador. Missouri Botanical Garden Press, Herbario de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Herbario Nacional, Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales, Departament of Systematic Botany Aarhus University, Quito.

KASPERSON JX, KASPERSON RE, TURNER BLII (1995) Regions at risk: comparisons of threatened environments. United Nations University Press, Tokyo.

KAZAKIS G, GHOSON D, VOGIATZAKIS IN, PAPANASTASIS VP (2006) Vascular plant diversity and climate change in the alpine zone of the Lefka Ori Crete. Biodiversity and Conservation, 16(6): 1603-1615.

LEEMANS R, VAN VLIET A (2005) Responses of Species to Changes in Climate Determine Climate Protection Targets. In: Tirpak, D., Aston, J., Dadi, Z., Meira Filho, L.G., Metz, B., Parry, M., Schellnhuber, J., Yap, K.S., Watson, R., Wigley, T. Avoiding Dangerous Climate Change. DEFRA & Met Office, Exeter, UK.

LIU C, BERRY PM, DAWSON TP, PEARSON RG (2005) Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. Ecography 28: 385-393.

LOBO JM, JIMÉNEZ-VALVERDE A, REAL R (2008) AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. Global Ecology and Biogeography 17: 145-151.

LÓPEZ MF (2009) Evolución de las fronteras antropogeográficas en el páramo de la Sierra Norte del Ecuador a finales del siglo XX. Paramundi II Congreso Mundial de Páramos, Loja, Ecuador.

MALCOLM JR, MARKHAM A, NEILSON RP, GARACI M (2002) Estimated migration rates under scenarios of global climate change. Journal of Biogeography 29: 835-849.

MANEL S, WILLIAMS HC, ORMEROD SJ (2001) Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence. Journal of Applied Ecology 38: 921-931.

MARTÍNEZ C (2009) Dinámica de cambios de uso del suelo en zonas altoandinas del Ecuador. Paramundi II Congreso Mundial de Páramos, Loja, Ecuador.

MITCHELL TD, JONES PD (2005) An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. International Journal of Climatology 25: 693-712.

MUÑOZ J, FELICÍSIMO AM (2004) A comparison between some statistical methods commonly used in predictive modeling. Journal of Vegetation Science 15: 285-292.

MYERS N, MITTERMEIER RA, MITTERMEIER CG, DA FONSECA GAB, KENT J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature 403: 853-858.

NAKICENOVIC N, SWART R (2000) Emissions Scenarios. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, University Press.

OHLEMÜLLER R, GRITTI ES, SYKES MT, THOMAS CD (2006) Quantifying components of risk for European woody species under climate change. Global Change Biology 12: 1788-1799.

PARRA J, GRAHAM C, FREILE J (2004) Evaluating alternative data sets for ecological niche models of birds in the Andes. Ecography 27: 350-360.

PEARSON RG (2006) Climate change and the migration capacity of species. Trends in Ecology and Evolution, 21(3): 111-113.

PEARSON RG, DAWSON TP (2003) Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? Global Ecology and Biogeography 12: 361-371.

PETERSON AT, NAKAZAWA Y (2008) Environmental data sets matter in ecological niche modelling: an example with Solenopsis invicta and Solenopsis richteri. Global Ecology and Biogeography 17: 135-144.

PHILLIPS SJ, ANDERSON RP, SCHAPIRE RP (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling 190(3/4): 231-259.

PHILLIPS SJ, DUDÍK M (2008) Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography 31: 161-175.

PONTIUS JR RG (2000) Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 66: 1011-1016.

RIVAS-MARTÍNEZ S, RIVAS-SÁENZ S (2009) Sistema de Clasificación Bioclimática Mundial 1996-(2009). Centro de Investigaciones Fitosociológicas España, http://www.ucm.es/info/cif

ROSENFIELD GH, FITZPATRIC-LINS K 1986 A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 52(2): 223-227.

RUIZ-MURCIA, J F (2010) Cambio climático en temperatura precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (panorama 2011-2100). Nota técnica del IDEA, 91 p.

SALA OE, CHAPIN III FS, ARMESTO JJ, BERLOW E, BLOOMFIELD J, DIRZO R, HUBER-SANWALD E, HUENNEKE LF, JACKSON RB, KINZING A, LEEMANS R, LODGE DM, MOONEY HA, OESTERHELD M, LEROY POFF N, SYKES MT, WALKER BH, WALKER M, WALL DH (2000) Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. Science 287: 1770-1774.

SIERRA R (Ed) (1999) Propuesta Preliminar de un Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continental. Proyecto INEFAN/ GEF-BIRF y EcoCiencia, Quito, Ecuador.

THOMAS CD, CAMERON A, GREEN RE, BAKKENES M, BEAUMONT LJ, COLLINGHAM YC, ERASMUS BFN, FERREIRA DE, SIQUEIRA M, GRAINGER A, HANNAH L, HUGHES L, HUNTLEY B, VAN JAARSVELD AS, MIDGLEY GF, MILESS L, ORTEGA-HUERTA MA, PETERSON AT, PHILLIPS OL, WILLIAMS SE (2004) Extinction risk from climate change. Nature 427: 145-148.

THORNTHWAITE CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review 38: 55-94.

THUILLER W (2003) BIOMOD - optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. Global Change Biology 9: 1353-1362.

THUILLER W (2004) Patterns and uncertainties of species' range shifts under climate change. Global Change Biology 10: 2020-2027.

THUILLER W, LAVOREL S, ARAÚJO B, SYKES MT, PRENTICE CI (2005) Climate change threats to plant diversity in Europa. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 102: 8245-8250.

THUILLER W, ALBERT C, ARAÚJO MB, BERRY PM, CABEZA M, GUISAN A, HICKLER T, MIDGLEY GF, PETERSON J, SCHURR FM, SYKES MT, ZIMMERMANN NE (2008) Predicting global change impacts on plant species' distributions: Future challenges. Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics 9: 137-152.

VITOUSEK PM, MOONEY HA, LUBCHENCO J, MELILLO JM (1997) Human domination of Earth's ecosystems. Science 277: 494-499.

WEIGELT A, JOLLIFFE P (2003) Indices of plant competition British Ecological Society; Journal of Ecology 91: 707-720.

RED IBEROAMERICANA PARA EL ESTUDIO DE LOS ECOSISTEMAS FORESTALES ANTE EL CAMBIO GLOBAL

Argentina	Universidad Juan Agustín Maza
	Universidad Nacional de Cuyo
Bolivia	Instituto Boliviano de Investigación Forestal
Colombia	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
Ecuador	Fundación para la Investigación y Conservación de Ecosistemas Acuáticos
España	Universidad de Extremadura
	Instituto de Desarrollo Regional de la UCLM
México	Universidad Autónoma de México

CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo